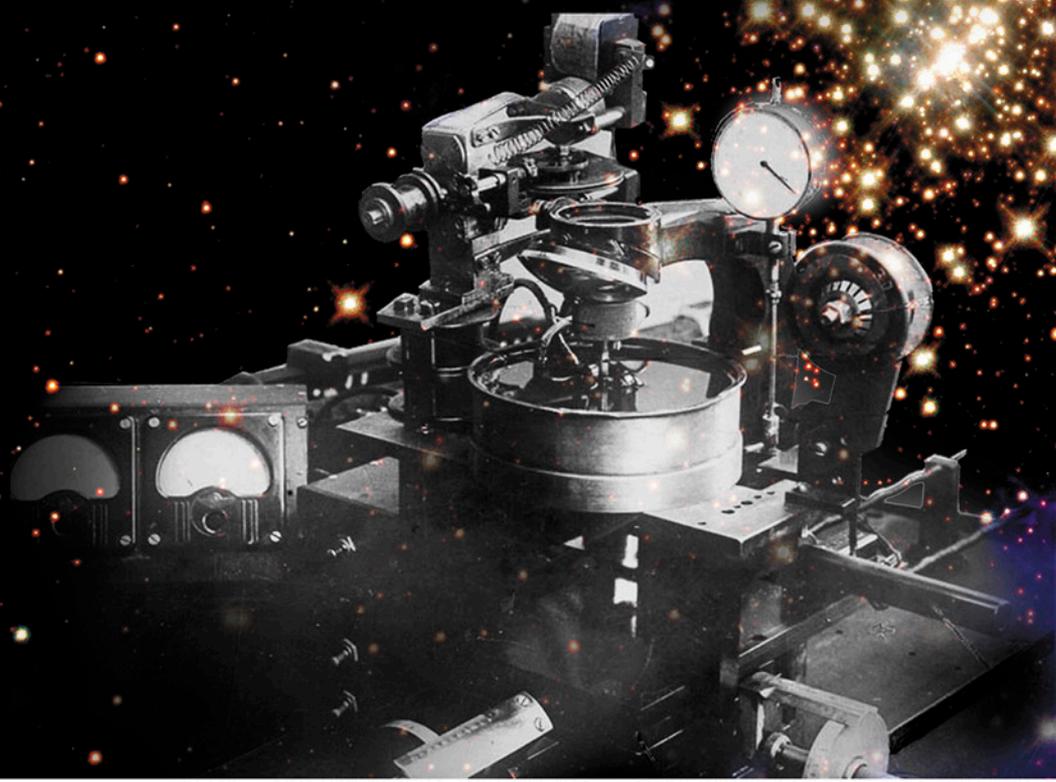


Борис Иванович СТАВИЦКИЙ

ИЗ ИСТОРИИ электроискровой обработки материалов



ИЗ ИСТОРИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

*«Многовековое царствование механического способа обработки металлов...
кончается. Его место занимает более высокоорганизованный процесс,
когда обработка производится электрическими силами.*

*Не может быть причин, которые бы приостановили развитие этого
революционного процесса, ломающего существующие представле-
ния об обработке материалов. Ему будет принадлежать будущее,
и притом — ближайшее будущее».*

Б.Р. Лазаренко, 1947 г.



ВСТУПЛЕНИЕ К КНИГЕ ОТ АВТОРА

Перед Вами, дорогие читатели, книга, написанная благодаря содействию Лежепекова Александра Борисовича, руководителя ООО Содиком, с которым судьба свела меня десятки лет тому назад.

Япония, одна из первых в мире, применила способ электроискровой обработки металлов, сплавов и других материалов, открытый советскими учёными супругами Лазаренко Борисом Романовичем и Наталией Иоасафовной и посвятившим свою жизнь этому процессу.

Фирма Jарах была создана господином Киёси Иноу с момента открытия впервые в мире в СССР электроискрового способа обработки металлов. Господин Иноу первым в Японии создал Институт электроискровой обработки металлов. Он поддерживал с Лазаренко связь, надеясь на личную встречу. Однако эта встреча, к сожалению, так и не состоялась.

С помощью Лежепекова А.Б. (представителя SodicoM) более восьми лет в Харькове издаётся международный информационно-технический журнал «МЕТАЛЛО-ОБРАБОТКА. Оборудование и Инструмент для профессионалов». В нём регулярно, со второго номера 2006 года, выходили статьи «Из истории электроискровой обработки материалов».

Второе дополненное издание книги «Из истории электроискровой обработки материалов - 2» содержит исправления, допущенные редакцией, к сожалению, в первом издании и дополненные материалами по особо точным методам.

Книга посвящается:

- лауреатам Сталинской премии ЛАЗАРЕНКО Борису Романовичу и Наталии Иоасафовне, изобретателям способа обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов высококонцентрированными электрическими разрядами (электроискрового способа),*
- моей покойной супруге СТАВИЦКОЙ Алле Михайловне, вдохновившей меня на разработку новых методов электроискрового изготовления деталей, удостоенных Ленинской премии.*
- ФЁДОРОВУ Мстиславу Михайловичу, директору НИИ-160 с 1953 по 1961 годы, а затем заместителю министра электронной промышленности, давшему «зеленую улицу» развитию электроискрового метода в НИИ-160 и на предприятиях электронной и смежных отраслей промышленности, удостоенного в 1963 г. Ленинской премии за разработку новых методов изготовления осеботорочных деталей.*

Б.И. Ставицкий

ОТ РЕДАКЦИИ

«Мы вместе с Вами поднимаем общее государственное дело, следовательно, и отношение к нему должно быть государственным, а то, что я описал, — это порочно и не характерно для нашего стиля работы. Этого не должно быть!», — написал в своем обращении к руководству страны один из изобретателей метода электроискровой обработки металлов Б. Р. Лазаренко.

Фразу «Этого не должно быть!» хочется поставить эпиграфом не только к данной публикации. Бездарное отношение со стороны высших чиновников страны к передовым разработкам инженеров и ученых СССР привело к потере ведущих позиций во многих отраслях промышленности и было не единичным, к сожалению. Поэтому задача данной книги, с одной стороны, напомнить о первенстве и достижениях советских специалистов в области электроискровой обработки, с другой — стать первой в ряду своеобразных памятников советской науке и технике, для того чтобы будущие поколения знали, что многие предметы, окружающие их, появились и благодаря таланту специалистов страны Советов, для которых нередко творческие разработки и инженерные изыскания были делом всей жизни. И сегодня, оглядываясь назад, можно только с горечью предположить, какого высочайшего уровня могло достичь промышленное производство СССР — основа благосостояния и независимости страны, — если бы конструкции и технологии огромной армии талантливых советских инженеров были внедрены и реализованы. Это в полной мере относится и к автору книги — Б. И. Ставицкому, и его соратникам, впервые разработавшим технологии и создавшим устройства для прецизионной электроискровой обработки металлов. В настоящий момент в результате общеизвестных исторических событий и ситуации, сложившейся вокруг отдела электрических методов обработки материалов во Фрязино (подробнее об этом — в книге), перспективные разработки, проводимые там, прекращены, но их результаты использованы для создания современных европейских и японских установок, которые сегодня активно поставляются на территорию постсоветского пространства.



Борис Иванович СТАВИЦКИЙ

Лауреат Ленинской премии, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Украинец. Родился 19 декабря 1927 г. в г. Луганске, УССР. Окончил Московский авиационный технологический институт (МАТИ) в 1950 г. по специальности «Технология механической обработки металлов». Инженер-технолог по механической обработке металлов в авиастроении. После окончания МАТИ и специальных курсов МВТУ им. Н.Э. Баумана был направлен на вновь построенный Саратовский завод электровакуумного машиностроения в отдел главного технолога. В конце 1953 г. после успешной сдачи экзаменов распоряжением Министерства электростанций и электропромышленности СССР был переведен в аспирантуру ГС НИИ ГК СМ СССР по радиоэлектронике — НИИЭТ — ГНПП «Исток» МЭП СССР, г. Фрязино. Тема диссертации: «Исследование возможности применения электроискровой обработки для изготовления прецизионных деталей электровакуумных приборов» (1958 г.). Старший научный сотрудник по специальности «Вакуумная и газоразрядная электроника, включая материалы, технологию и специальное оборудование» (1978 г.). Начальник лаборатории — отдела электрических методов обработки материалов (1957–1992 г.), главный конструктор электроискрового оборудования электронной промышленности (1967–1992 гг.).

Публикуется с 1956 г. Сфера научных интересов: вакуумная и газоразрядная электроника, включая технологию и специальное оборудование; электро-физико-химические технологии и оборудование; физика электрических разрядов; научные основы электроискровой обработки материалов; новые методы электроискрового особо точного формообразования поверхностей и их физико-технологические основы; история электроискровой обработки материалов.

Автор множества статей, размещенных в журнале «Электронная обработка материалов» Института прикладной физики АН МССР — Республики Молдова (1966–2003 гг.), имеющем англоязычную версию в США. А также публиковался в «Applied electrical phenomena. Consultants bureau», а затем — в «Surface engineering and applied electro chemistry».

Член Научного совета АН СССР по проблеме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов». Участник семинаров: в ИМЕТ АН СССР «Физика и химия обработки материалов концентрированными потоками энергии» по теме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов»; в Институте машиноведения АН СССР по проблемам «Теоретические основы и опыт применения новых методов обработки металлов». Выступал с докладами на многих всесоюзных конференциях и совещаниях: в Ленинградском и Московском ДНТП, в Доме оборонной техники, в Центральном Российском Доме знаний, ЦНИЛ-Электром АН СССР. Член секции научно-технического совета Министерства электронной промышленности СССР и некоторых международных симпозиумов по электрическим методам обработки металлов — ISEM (International Symposium for Electromachining).

Введение

К числу выдающихся открытий XX века относится изобретение советскими учеными, супругами Борисом Романовичем и Наталией Иоасафовной Лазаренко, принципиально нового способа обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов, а именно — электроискровой обработки, известной сейчас во всем мире как *Electro Discharge Machining of Materials*. Этот способ, как известно, основан на использовании высококонцентрированных электрических разрядов для съема с обрабатываемой заготовки или нанесения на нее материала. Он поистине открыл новую эру в промышленных технологиях, обеспечив использование электрической энергии непосредственно для формообразования деталей из любых токопроводящих и полупроводниковых материалов, независимо от их физико-химических и механических свойств, а также упрочнения и легирования их поверхностей.

На основе анализа вольт-амперной характеристики электрических процессов, протекающих между двумя неподвижными электродами при атмосферном давлении, и большого числа

исследований, а также сравнения их с результатами работ по спектрографическому анализу, катодному распылению металлов, электрической дуговой сварке металлов, Б.Р. и Н.И. Лазаренко был сделан ряд обобщений.

1. Любая самостоятельная форма электрического разряда в газах сопровождается эрозией действующих электродов.

2. При коммутации электрических цепей, прежде чем наступит непосредственное соприкосновение металлических поверхностей электродов, всегда наблюдается электрический пробой межэлектродного пространства.

3. Каждой форме самостоятельного электрического разряда соответствует присущая ей полярность эрозии электродов.

4. Искровая форма электрического разряда сопровождается преобладающей убылью анода.

5. Переход искровой формы электрического разряда в дуговую (и обратно) сопровождается инверсией электрической эрозии.

6. Электрическая эрозия — неотъемлемое свойство любых токопроводящих материалов; другими словами, нет и не может быть антиэрозионных токопроводящих материалов.

Появившись в 1938 г., электроискровой способ обработки материалов открыл неограниченные возможности для совершенствования различных производств. Приоритет советских ученых Б.Р. и Н.И. Лазаренко в открытии этого принципиально нового способа обработки под-

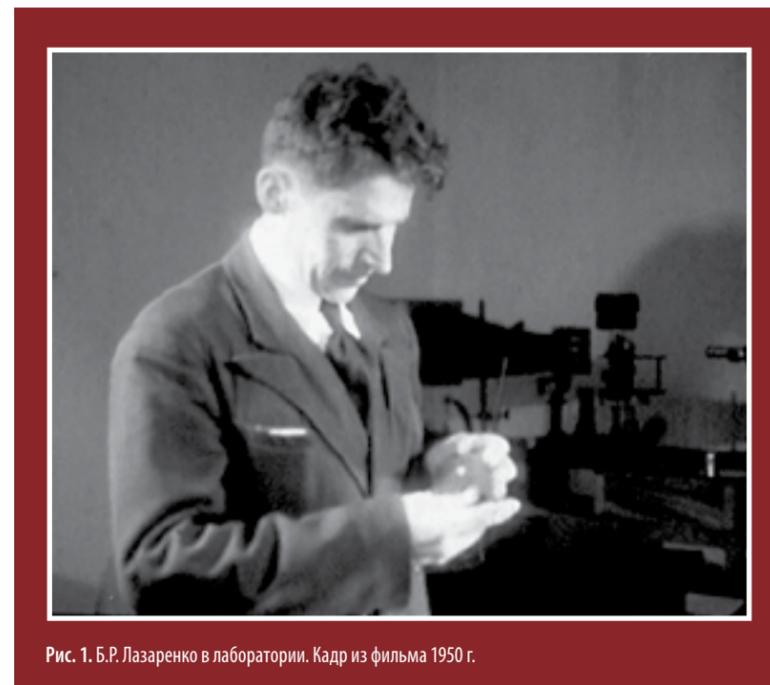


Рис. 1. Б.Р. Лазаренко в лаборатории. Кадр из фильма 1950 г.

тверждается авторским свидетельством №70010 от 3.04.1943 г., а также патентами других государств: Франции — №525414 от 18.06.1946 г., Великобритании — №285822 от 24.09.1946 г., США — №6992718 от 23.08.1946 г., Швейцарии — №8177 от 14.07.1946 г., Швеции — №9992/46 от 1.11.1946 г., а также многочисленными публикациями.

За открытие и разработку этого способа супругам Б.Р. и Н.И. Лазаренко в 1946 г. была присуждена Сталинская премия. Решением Высшей аттестационной комиссии от 26 июня 1949 г. Б.Р. Лазаренко (рис.1) была присуждена ученая степень доктора технических наук.

Однако появление электроискровой технологии в начале 1940-х гг. было в какой-то степени преждевременным, так как уровень развития ряда отраслей техники того времени (да и 2–3 десятилетия спустя) не обеспечивал достаточно полной реализации его возможностей. С одной стороны, применявшиеся традиционные методы металлообработки вполне отвечали потребностям промышленности, а основные потребители электроискрового способа

еще только появлялись. С другой стороны, в то время еще не были созданы устройства, появившиеся только в конце XX века и позволяющие наиболее эффективно использовать достоинства электроискровой обработки: 32-разрядные ЧПУ и линейные электродвигатели, обеспечивающие значительную скорость и ускорение подачи, исключительно малые люфты и погрешности шага, минимум трения и высокую дискретность. Появились сегодня и быстродействующие коммутационные приборы, высокоточные датчики линейных перемещений и измерительные линейки, выведшие электроискровое оборудование на принципиально новый технический уровень, недостижимый еще 10–15 лет назад.

По мере развития техники, с появлением новых материалов, устройств и приборов, особенно с расширением возможностей и повышением надежности управляющих микро-ЭВМ были созданы высокопроизводительные и особо точные электроискровые обрабатывающие комплексы, существенно расширилась область применения этого способа обработки материалов, повысилась эффективность его использования в промышленности. Этим и объясняется непрерывное обновление данного способа и неисчерпаемость его возможностей.

В многолетнем соревновании с другими способами металлообработки электроискровой способ доказал свою перспективность, чрезвычайную простоту осуществления, малую энергоемкость и практически неограниченную область применения.

В настоящее время мировой рынок электроискрового оборудования делят 4 компании — лидера отрасли: японские SODICK и MITSUBISHI ELECTRIC, а также швейцарские AGIE и CHARMILLES.

О популярности этой технологии говорит, в частности, и тот факт, что в мире сегодня выпускается более 20000 единиц электроискровых станков различного класса и уровня сложности.

1. Открытие новой технологии и доказательство ее работоспособности

После открытия электроискрового способа (1938 г.) потребовался определенный отрезок времени с (1943—1946 гг.) для экспериментального доказательства того, что по своим технологическим возможностям он в определенных случаях превосходит обработку металлов механическим резанием.

Изучив закономерности разрушения электрических контактов и получив с помощью электрических разрядов первые отверстия в металлических пластинах (рис. 2), изобретатели высказали предположение, что нет и не может быть токопроводящих материалов, кото-

рые бы не обрабатывались электрическими разрядами.

С тех пор прошло более 60 лет, однако нам не известно, чтобы кто-нибудь нашел хотя бы одно исключение из этого правила.

Б.Р. и Н.И. Лазаренко особо подчеркивали, что именно в искровом разряде наиболее целесообразно концентрировать электрическую энергию во времени и в пространстве. Ими были сформулированы две особенности этого процесса:

- 1) простота получения искровой формы разряда;
- 2) исключительная легкость управления интенсивностью процесса обработки, позволяю-

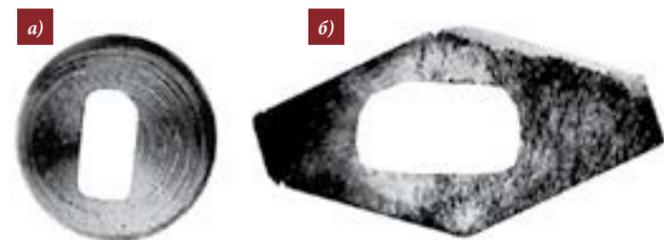


Рис. 2. Стальная (а) и твердосплавная (б) заготовки, на которых впервые в мире была доказана возможность изготовления электроискровым способом отверстий, повторяющих профиль медных пластин (1943 г.)

щая либо «обрушивать» на место обработки потоки мощнейших разрядов, грубо удаляющих порции металла по строго заданным направлениям, либо заставлять искру проводить «ювелирную» работу.

Несмотря на то, что авторы указывали на возможность применения метода для точного изготовления деталей, он вначале применялся преимущественно для грубой обработки металлов, главным образом для заготовительных работ. В этом направлении в основном и проводились соответствующие научные исследования.

Промышленное применение электроискрового способа началось до его официальной регистрации. Он использовался в первые годы Великой Отечественной войны на Урале при изготовлении реактивных снарядов для ракетных установок «Катюша».

На рис. 3 показаны прообразы первых электроискровых установок. На рис. 4 представлен один из станков, созданных в начале 1940-х гг., а на рис. 5 — полученные образцы.

С помощью этих образцов была впервые доказана возможность обработки токопроводящих материалов искровыми разрядами.

На основании исследований поведения материала электродов под действием различных форм разряда (независимо от способов увеличения напряженности электрического поля) авторы сделали следующие обобщения:

- ♦ каждой форме самостоятельного электрического разряда соответствует присущая ей полярность эрозии электродов;
- ♦ искровая форма разряда сопровождается преобладающей убылью анода;
- ♦ переход искровой формы электрического разряда в дуговую (и обратно) сопровождается инверсией электрической эрозии.

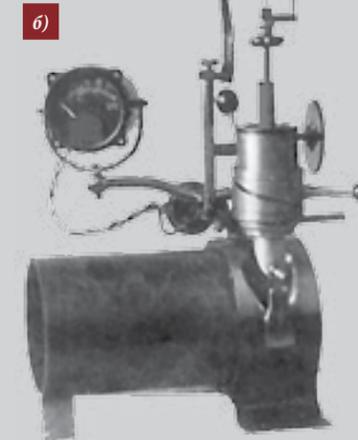
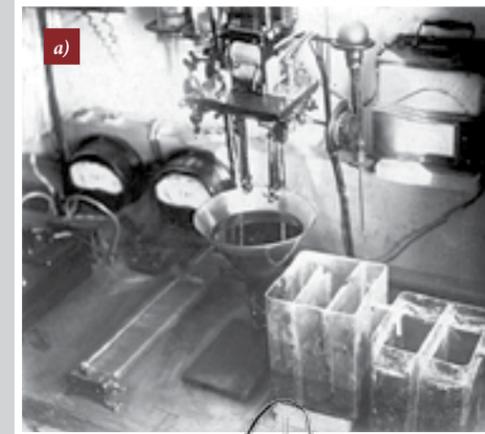


Рис. 3. Прообразы первых электроискровых установок:

а — установка для изготовления порошков: именно на ней была открыта возможность применения электроискрового способа обработки металлов;
б — устройство для извлечения сломанного инструмента из корпусов реактивных снарядов

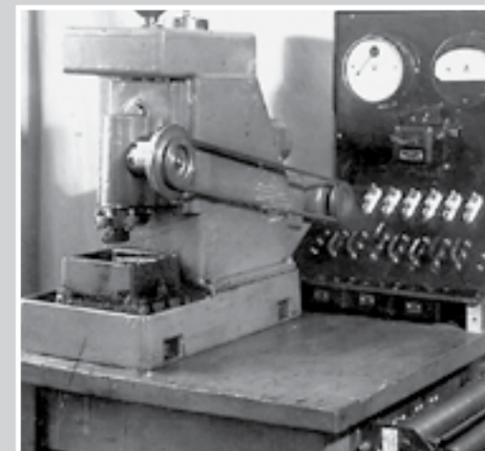


Рис. 4. Электроискровой прошивочный станок контактного действия ЭПС-КМП (1944—1945 гг.)

Рис. 5. Внешний вид электродов, после размерной обработки токопроводящих материалов искровыми импульсами электрического тока:

а — анод с насковью прошитым отверстием с помощью прямоугольной пластины-катода;
б — катод с отпечатком пластины-анода



2. Максимум производительности, минимум качества

На следующем этапе (конец 1940-х — середина 1950-х гг.) развития техники электроискровой обработки были созданы научно-исследовательские лаборатории, началась подготовка специалистов в данной области и созданы первые в ми-

ре промышленные электроискровые установки, было начато их производство.

В середине 1940-х гг. по инициативе Б.Р. Лазаренко в Московском авиационном технологическом институте (МАТИ) была организована лаборатория электроискровой обработки материалов (рис. 6, 7).

Лаборатория была оснащена установками различного назначения: для разрезания металлов, прошивки отверстий любого профиля, круглого шлифования и др., — созданными преимущественно на базе металлорежущих станков.

Вскоре случилось непредвиденное: сменилось руководство института. Идея Бориса Романовича о подготовке специалистов по специальности «Электроискровая обработка материалов в авиастроении» не получила поддержки у нового директора. Поэтому он был вынужден прекратить работу в МАТИ, а электроискровая лаборатория в этом институте прекратила свое существование.

Впрочем вскоре, а именно 16 июня 1948 г., Постановлением Правительства СССР, подписанным И.В. Сталиным, была создана Центральная научно-исследовательская лаборатория электрической обработки материалов (ЦНИЛ-Электром), руководителем которой



Рис. 6. Б.Р. Лазаренко в лаборатории электроискровой обработки материалов МАТИ, 1948 г. Слева направо: Т.И. Макеева, Д.З. Митяшкин, Б.Р. Лазаренко, А.М. Белов, Б.Н. Лямин



Рис. 7. В лаборатории электроискровой обработки материалов МАТИ, 1948 г.



был утвержден Б.Р. Лазаренко. На первых порах она входила в состав НИИ-627 Министерства электротехнической промышленности СССР. В 1953 г. ЦНИЛ-Электром была выделена в самостоятельную организацию, а в 1955 г. передана в систему АН СССР.

В эти годы ЦНИЛ-Электром, руководимая Б.Р. Лазаренко, стала «кузницей кадров», из которой вышли первые советские ученые-«электроискровики» (рис. 8). Под руководством Б.Н. Золотых проводились фундаментальные исследования и изучалась физическая основа электроискровой обработки металлов. К сожалению, достаточное внимание уделялось лишь исследованию электрической эрозии электродов в разряде при запасах энергии в импульсе в диапазоне от десятых долей джоуля до нескольких джоулей. Совершенно не изучалась эрозия электродов при энергии импульса менее 0,001 Дж, а именно этот диапазон энергии характерен для электроискровой прецизионной обработки металлов. Кроме того, применявшаяся методика была слишком трудоемкой, не могла отражать в полной мере процессы, происходящие на электродах, и давать объективную картину воздействия искрового разряда на аноде и катоде.

Для осуществления различных технологических процессов электроискровым способом были созданы различные конструкции установок: для прошивки разнообразных отверстий, разрезания заготовок различного профиля, шлифования, упрочнения и легирования различного металлорежущего инструмента. На рис. 9 показана одна из созданных в ЦНИЛ-Электром экспериментальных электроискровых установок для разрезания различных материалов движущейся лентой. В качестве межэлектродной среды здесь использовалась суспензия каолина.

На рис. 10 и 11 показаны примеры электроискрового разрезания сортового проката

дисковой пилой в качестве электрода-инструмента, роль которой выполнял диск из кровельного железа. Так, швеллеры № 6 до № 16 резались, в зависимости от площади сечения, от 20 с до 1,4 мин, а уголок от № 4 до № 10 — от 12 до 50 с. Железнодорожный рельс можно было перерезать за 1,5 мин.

Интересным вариантом применения электроискрового способа явилось шлифование мукомольных валков Ø250 мм в отработанном авиационном масле или смеси 2/3 машинного и 1/3 веретенного масла. Это осуществлялось при напряжении холостого хода $U_{х.х} = 12...38$ В, рабочем напряжении $U_p = 10...30$ В и рабочем токе $I_p = 10...100$ А.

В 1947–1948 гг. при изготовлении отверстий Ø 0,15 + 0,01 мм в массово выпускаемых деталях — распылителях дизельной топливной аппаратуры — электроискровой метод полностью вытеснил операцию механического сверления. При



Рис. 8. Б.Р. Лазаренко среди молодых ученых ЦНИЛ-Электром. Слева направо: Б.Р. Лазаренко, В.К. Нежежин, Б.Н. Золотых и Е.А. Деев



Рис. 9. Экспериментальная установка для разрезания различных материалов движущейся лентой

этом уже на первых порах, т.е. без каких-либо элементов автоматизации, производительность возросла в 6 раз, а брак снизился до 0,5 %. Позднее на участке электроискровой обработки отверстий, оснащенный полуавтоматическими установками, производительность возросла в 300 раз.

Анализ развития электроискрового способа в этот период показывает, что основные усилия исследователей были направлены на рост производительности процесса за счет увеличения энергии и длительности разрядов — до нескольких джоулей и сотен или тысяч микросекунд соответственно.

Господствовало стремление получать максимальную интенсивность съема металла в еди-

ницу времени или за один искровой разряд. Однако это приводило к существенному снижению точности обработки и ухудшению качества обработанной поверхности, появлению проблем с удалением из межэлектродного промежутка продуктов эрозии, существенным структурным изменениям в поверхностном слое материала. Точность изготовления деталей определялась сотыми или даже десятными долями миллиметра, шероховатость составляла не менее $Ra = 5-10$ мкм.

Из-за этого в середине 1950-х гг. утвердилось мнение, что предел возможностей электроискровой технологии уже достигнут, особенно в отношении точности и минимальной шероховатости, и что этот способ нельзя применять для окончательной обработки.

Некоторые исследователи даже утверждали, что при малых энергиях и длительностях импульсов будет отсутствовать съем материала. Следует отметить, кстати, что столь одностороннее направление работ привело в конечном итоге к значительной задержке развития в СССР такого перспективного направления, как электроискровая прецизионная обработка.

Технологию электроискровой обработки с максимально возможной производительностью в СССР в то время развивали Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков (ЭНИМС) и СКБ электроэрозионного оборудования Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности. Ими был создан ряд станков (4В721, 4В722, 4723, 4А724 и др.), на которых точность обработки деталей не превышала 0,02–0,07 мм, а наименьшая шероховатость обработанной поверхности лежала в пределах 10–25 мкм.

3. Технологии и оборудование для производства сеток клистронов для СВЧ-приборов

Третий этап развития электроискровой технологии (середина — конец 1950-х гг.) характеризуется разработкой новых методов особо точного формообразования поверхностей электродом-проволокой, так называемого «обратного», а также последовательного копирования профиля электрода-инструмента и началом развития прецизионной электроискровой обработки металлов.

Начало этого этапа связано с проблемой изготовления особо точных деталей электровакуумных приборов, работающих на излучениях сверхвысоких частот (СВЧ). Становление и бурное развитие электронной промышленности было вызвано потребностью в принципиально новых приборах. Для них необходимо было изготавливать миниатюрные сложнопрофильные детали с микронной точностью и хорошим качеством обработанной поверхности (Ra не более десятых долей микрометра): сеток клистронов, анодных блоков магнетронов и замедляющих систем ламп обратной волны миллиметрового диапазона, катодов и анодов клистронов, малошумящих

СВЧ-усилителей, электронно-оптических и индикаторных электронно-лучевых приборов, а также сложнопрофильного инструмента, например, пуансонов для холодного выдавливания деталей электронных приборов (в т.ч. анодных блоков магнетронов).

Сетки этих приборов делались плетеными или навивались из вольфрамовой проволоки ВА диаметром 0,02–0,03 мм. Большие входные мощности, необходимые для нормальной работы этих приборов, при недостаточном отводе тепла приводили к перегреву и прогоранию сеток. Даже в тех случаях, когда прогорание не наступало, потери из-за перегрева сеток резко возрастали: с одной стороны, увеличивались высокочастотные потери на них, с другой — резко возрастали так называемые электронные потери, связанные с термомиссией сеток. Все это отрицательно сказывалось на сроке службы и мощности приборов.

Получение их традиционными способами было невозможно или представляло большие трудности. Особые сложности возникали при изготовлении приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн, где размеры элементов деталей составляли десятые, сотые, а иногда и тысячные доли миллиметра. Требовались прин-



Рис. 10. Электроискровое разрезание сортового проката дисковой пилой

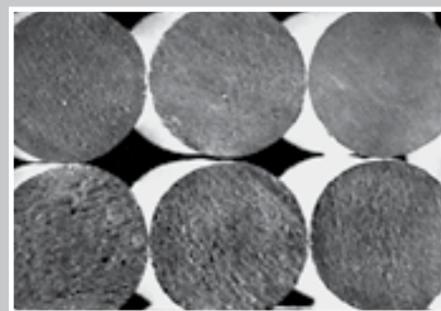


Рис. 11. Внешний вид сечений заготовок Ø 30 мм, разрезанных на различных режимах

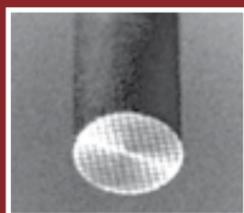


Рис. 12. Электрод-инструмент для прошивки сеток $\varnothing 4,5$ мм, 26 пазов шириной 50 мкм на глубину 2 мм

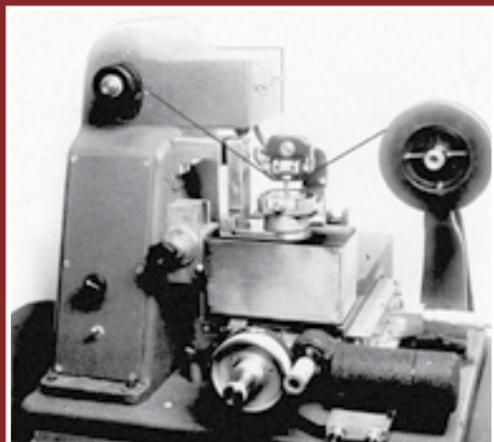


Рис. 13. Головка установки ЭКУ-1Б для изготовления электродов проволокой $\varnothing 0,03-0,04$ мм

ципиально новые методы особо точного формообразования поверхностей, основанные на иных принципах. Одним из таких методов и мог стать электроискровой способ обработки материалов. Однако в то время не было ни отечественного, ни зарубежного опыта создания соответствующего электроискрового прецизионного оборудования; требовалось выяснить саму возможность изготовления прецизионных деталей подобным способом.

Исследования, выполненные в 1954–1958 гг. в НИИ-160 (основной целью создания которого была разработка и выпуск электронных приборов для радиолокационной техники), показали не только возможность, но и целесообразность применения именно электроискрового способа для изготовления электронных приборов.

Результаты выполненных работ следующие:

1) созданы физико-технологические основы электроискровой прецизионной обработки материалов;

2) разработаны новые методы электроискрового формообразования особо точных деталей (электродом-проволокой и методами последовательного копирования профиля электрода-инструмента);

3) разработаны оригинальные технологические процессы изготовления прецизионных деталей электронных приборов и технологического

инструмента, основанные на идее использования зоны минимального взаимодействия электродов (инструмента и детали);

4) создано принципиально новое электроискровое прецизионное оборудование, прежде всего для изготовления деталей электродом-проволокой, а также комбинированные установки.

Стало ясно, что изготовление деталей электродом-проволокой имеет неоспоримые преимущества по сравнению с методом копирования профиля электрода-инструмента. К существенным недостаткам последнего можно отнести следующие факторы:

- ♦ необходимость применения электрода-инструмента, точно воспроизводящего профиль изготавливаемой детали;

- ♦ электродом-инструментом определенного профиля можно изготовить деталь только подобного профиля;

- ♦ изготовление электрода-инструмента более трудоемко и требует высокой точности;

- ♦ необходима точная выверка оси электрода-инструмента с направлением оси его движения (подачи).

Возможности и преимущества электроискрового способа в наибольшей мере проявились при формообразовании деталей электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 0,03-0,04$ мм, поскольку в этом случае:

- ♦ обеспечиваются наилучшие условия естественного удаления продуктов эрозии из зоны обработки;

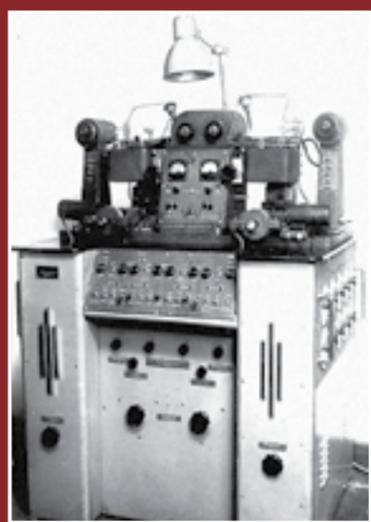


Рис. 14. Двухпозиционный полуавтомат A207.14 с электромеханическим программным управлением для прорезания пазов шириной 0,04–0,06 мм на торцах электродов, предназначенных для изготовления сеток ЭВЛ

- ♦ исключается влияние износа электрода-инструмента на точность изготовления деталей;

- ♦ затрачиваются минимальные количества энергии благодаря удалению ничтожно малого количества материала с обрабатываемой детали;

- ♦ отпадает необходимость изготовления высокоточных инструментов сложной формы, т. к. одним и тем же электродом-проволокой изготавливаются детали любой формы и различных размеров с вертикальными, наклонными и сложнопрофильными образующими поверхностями.

Возникла идея замены плетеных сеток из вольфрамосодержащей проволоки на выполненную из медной пластинки, где ширина перемычек была равна диаметру проволоки (чтобы сохранить прозрачность сеток для электронов), а высота — в 5–10 раз больше. Благодаря этому было увеличено сечение перемычек, что с учетом большей теплопроводности меди по сравнению с вольфрамом увеличило бы интенсивность отвода тепла от сетки в десятки раз. Изготовить их (в частности, с квадратными или прямоугольными ячейками) каким-либо из традиционных способов было невозможно. Тем более что разброс ширины перемычек не должен превышать 0,002 мм (т. е. составлять не более 0,1 доли ширины перемычки), а шероховатость обработанной поверхности — 0,4 мкм. Шаг расположения перемычек не должен иметь отклонений более 0,005 мм.

В то время уже была известна технология электроискрового изготовления сеток с круглыми отверстиями для фильтров тонкой очистки методом последовательного получения отверстий. При этом интенсивность процесса не превышала 0,04 мм³/мин, шероховатость обработанной поверхности Ra составляла не менее 0,8 мкм, а вспомогательное время на одно отверстие равнялось 4 с. Однако время изготовления сеток приборов с числом отверстий 90–150 шт. таким методом достигало бы 60 мин и более, что излишне много. Вывод ясен: все квадратные отверстия сетки размером 0,2–0,5 мм должны изготавливаться одновременно. Если осуществлять последовательное изготовление отверстий, это потребует применения для прошивки высокоточной координатной установки, решения проблемы изготовления точных электродов квадратного сечения и значительного вспомогательного времени.

Электроискровое изготовление цельных сеток стало возможным благодаря применению специальных электродов-инструментов (рис. 12), обеспечивающих одновременную прошивку всех отверстий и представлявших собой стержни из меди соответствующего профиля. На их торцах на глубину 2 мм (для сеток толщиной несколько десятых долей миллиметра) выполнялись пазы шириной, соответствующей величине



Рис. 15. Сетка $\varnothing 4,5$ мм: 152 квадратных отверстия $0,25 \times 0,25$ мм. Ширина перемычек 30 мкм



Рис. 16. Медная сетка отражательного клистрона $\varnothing 7$ мм

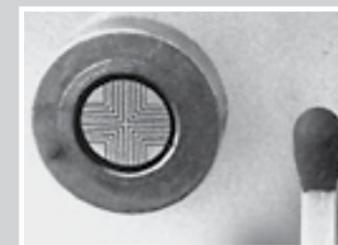


Рис. 17. Сетка вольфрамовая $\varnothing 5$ мм

не перемычек сетки, а их шаг был равен шагу перемычек (обычно 0,2–0,5 мм). Получение таких электродов-инструментов, имеющих узкие пазы на торцах шириной 0,04–0,05 мм с погрешностью не более 0,002 мм, также представляло собой определенную техническую проблему. Изготовление этих изделий осуществлялось электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 0,03-0,04$ мм на специально созданном оборудовании: вначале на установке ЭКУ1 Б (рис. 13), созданной на базе микроскопа МБИ-1 и координатного столика с микрометрическим перемещением кареток, а затем на 2-позиционных полуавтоматах А207.14 с электромеханическим программным управлением для прорезания пазов (рис. 14).

На рис. 15, 16 показаны медные сетки отражательных клистронов $\varnothing 4,5$ мм и $\varnothing 7$ мм с перемычками 30–40 мкм в заготовке толщиной 0,25 мм, а на рис. 17 — петлевая сетка, изготовленная в вольфрамовой заготовке $\varnothing 5$ мм, припаянной к медному корпусу, который имеет вид стакана.

Характерной особенностью электроискрового метода изготовления деталей вольфрамовой проволокой $\varnothing 0,03-0,04$ мм является высокая точность (до 2 мкм) и незначительная шероховатость обработанной поверхности ($Ra \leq 0,25$ мкм). При этом точность изготовления профиля определяется точностью относительного перемещения электрода-проволоки в заданных направлениях.

Вольфрамовая проволока марки ВА-3 $\varnothing 0,03$ мм имеет разрывное усилие 260–270 г, а $\varnothing 0,04$ мм — 410–450 г. Кроме своей высокой механической прочности ($\delta_p = 300...350$ кг/мм²), такая проволока также обладает высокой эрозионной устойчивостью. Наряду с вольфрамо-

Таблица 1. Режимы изготовления сеток из медных пластин для вакуумных СВЧ-генераторов малой мощности

Параметр и единица измерения	Обозначение	Величина
Напряжение на электродах, В	U_0	60–100
Энергия импульсов, мкДж	W_0	10–150
Длительность импульсов, мкс	t	$\leq 0,5$
Частота следования разрядов, 1/с	f	100 000–300 000

вой проволокой применяется и молибденовая — МЧ $\varnothing 0,025$ – $0,04$ мм, а также медная — марки МБ $\varnothing 0,08$ – $0,1$ мм. В качестве межэлектродной среды применялся осветительный керосин.

На рис. 18 показана головка полуавтоматической спаренной установки ЭПС-3 для изготовления сеток. Установка изготовлена с использованием микроскопа МБИ-1 с микрометрическим перемещением ползуна с точностью 2 мкм. Это обеспечивало плавную подачу электрода-инструмента и поддержание оптимальной величины межэлектродного зазора во время прошивки. Заготовка сетки 1 закрепляется на координатном столике 2, а электрод-инструмент 3 — в призме. Межэлектродная среда (керосин) находится в опускающейся ванне 4. Вибратор 5 обеспечивает амплитуду колебания электрода ≤ 5 мкм, что способствует интенсивному удалению продуктов эрозии без нарушения процесса искрообразования.

На рис. 19 представлена головка полуавтоматической установки А207.03 с автоматическим циклом изготовления сетки после закрепления электрода-инструмента и заготовки с последующей выверкой их взаимного расположения.

В ходе работы установки автоматически осуществляется подъем и опускание ванны с межэлектродной жидкостью, быстрый подход электрода к заготовке, закрепленной на вибраторе, переключение привода на следящую подачу, обеспечивающую поддержание межэлектродного промежутка. После прошивки сетки на заданную величину осуществляется быстрый отвод электрода, опускание ванны и снятие напряжения с электродов (заготовки и электрода-инструмента). Режимы изготовления сеток приведены в табл. 1. Указанные режимы обеспечивали шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,1$ – $0,4$ мкм.

Время изготовления сетки $\varnothing 3$ мм (95 отв., перемычки $0,03 \times 0,1$ мм) — 50 с, а сетки $\varnothing 4$ мм (200 отв., перемычки $0,03 \times 0,2$ мм) — 1,5 мин. Вспомогательное время составляло примерно 60–70 % от общего времени прошивки, значительная часть его приходилась на закрепление и съем заготовки. В течение 1 ч изготавливалось 40 сеток $\varnothing 3$ мм и примерно 24 — $\varnothing 4$ мм (на одной позиции установки ЭПС-3).

Таким образом, за смену можно было выпустить до 300 сеток $\varnothing 3$ мм или 180 сеток $\varnothing 4$ мм. При этом подготовительно-заключительное время не превышало 0,5 ч. По мере совершенствования

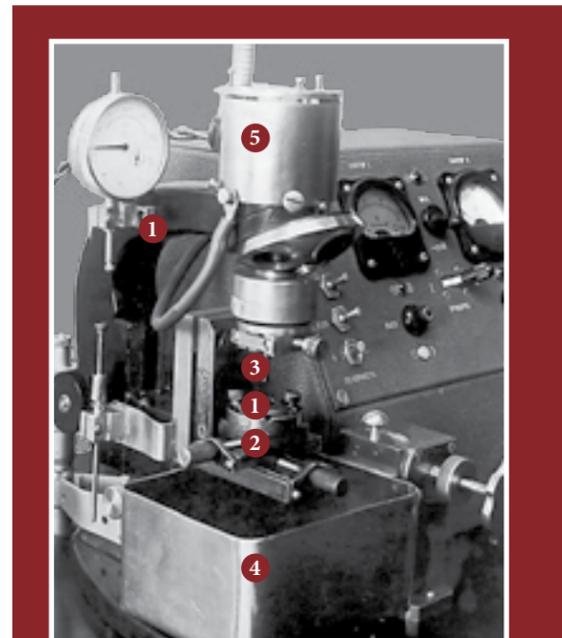


Рис. 18. Головка полуавтоматической спаренной установки ЭПС-3 для изготовления сеток

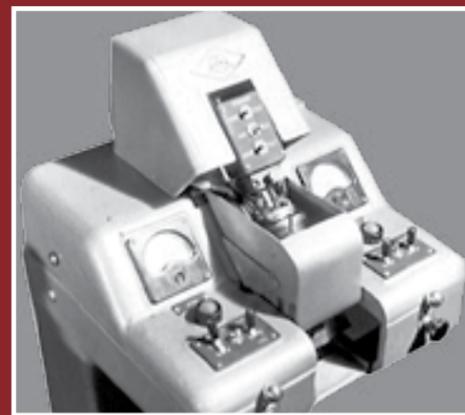


Рис. 19. Головка полуавтоматической установки А207.03 с автоматическим циклом изготовления сетки

технологии и конструкций установок для электроискровой изготовления прецизионных сеток производительность процесса возросла в 300 раз. Цельные сетки из меди МБ изготавливались для отражательных клистронов К-48, К-50 и др., которые применялись в радиорелейных линиях связи.

4. Разработка технологии и производство замедляющих систем для ЛОВ

Четвертый этап пришелся на 1960–1969 гг., он характеризовался следующими достижениями:

- ♦ разработка научных основ технологии и самих техпроцессов особо точного электроискрового формообразования;
- ♦ создание прецизионного оборудования и систем управления для осуществления этих методов:
 - а) генераторов биполярных импульсов напряжения, обеспечивших применение воды в качестве межэлектродной среды;
 - б) систем программного управления;
 - в) установок для изготовления деталей электронных приборов и инструментов;
- ♦ создание участков и цехов для электроискровой обработки на серийных предприятиях.

С организацией в 1960 г. Министерства электронной промышленности СССР и созданием отдела электроискровой обработки материалов в ОКБМ НИИ-160 начался новый этап развития особо точной электроискровой обработки материалов. В частности, стала возможной разработка ламп обратной

волны (ЛОВ) с электростатической фокусировкой, а также ЛОВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов.

Известно, что одной из важнейших деталей ЛОВ являются замедляющие системы (ЗС), состоящие из десятков или сотен штырей шириной от сотых до десятых долей миллиметра и длиной от сотых долей до единиц миллиметра. До появления электроискровой технологии ЗС ЛОВ сантиметрового диапазона изготавливались сборными из штампованных пластин или пакетировались из тонких пластин, полученных фотохимическими способами с последующей пайкой.

Теперь же такие замедляющие системы стали изготавливать электродом-проволокой $\varnothing 0,04$ мм.

Число штырей такой ЗС — 100. Общая длина — 125 мм. Так как расстояние между пазами за один проход проволоки — $0,06$ мм, то линия замедления изготавливалась за 2 прохода проволоки (рис. 20, а). В результате образовывался отход, идентичный изготовленной системе (рис. 20, б). Средняя скорость формообразования — 6 – 10 мм²/мин при

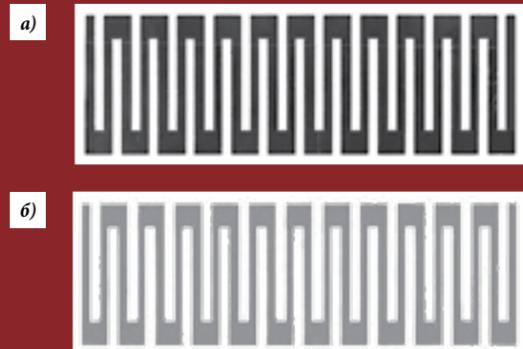


Рис. 20. а) Фрагмент силуэта ЗС из хромированной меди.
б) Фрагмент отхода. Штыри: ширина 0,4 мм, высота 5 мм.
Точность шага $\pm 0,005$ мм

$Ra \leq 0,5$ мкм, причем скорость перемещения проволоки не превышала 0,7 м/мин, а расстояние между центрами токоподводящих роликов — 15 мм.

Тонкие ЗС также изготавливались пакетом (по 4–8 шт.) с использованием 4-контурной схемы и 1 электрода-проволоки. Это обеспечивало 6-кратное повышение производительности процесса. Применение специальных электродов, выполненных «обратным» копированием с помощью первичного электрода-инструмента (в качестве которого может использоваться система, изготовленная проволокой), позволило «прошивать» такие системы электроискровым способом. Этот прием обеспечивал изготовление партий идентичных друг другу ЗС и в несколько раз сокращал время на изготовление одной системы.

На рис. 21 показан фрагмент силуэта линии замедления, изготовленной за один проход проволоки ВА-3 $\varnothing 0,04$ мм и состоящей из 3 медных пластин толщиной 0,1 мм с шириной пазов $0,05 + 0,005$ мм и штырями высотой 0,7 мм. Общее число пазов ЗС — 181.

На рис. 22 представлен фрагмент сборно-паяной ЗС, в которой будущие пролетные каналы изготовлены штамповкой. После сборки штампованных пластин и их пайки пазы, образующие собственно линию замедления, прорезались электродом-проволокой.

На рис. 23 — замедляющая система ЛОВ «Засечка». В ней не только пазы линии замедления, но и пролетные каналы на всю длину системы выполнены медной проволокой $\varnothing 0,1$ мм.

Группа установок А207.13 для изготовления электродом-проволокой различных деталей электровакуумных приборов представлена на рис. 24. Установки были созданы на базе больших инструментальных микроскопов БМИ-1.

На рис. 25 изображена установка с программным управлением ЭКУП-1 для изготовления ЗС ЛОВ.

Программное устройство позволяло очень просто изготавливать детали типа замедляющих систем. Шаг микрометрических винтов установки составлял 0,5 мм, причем на винте продольной подачи был жестко посажен датчик импульсов коллекторного типа, состоящий из коллектора и двух токопод-

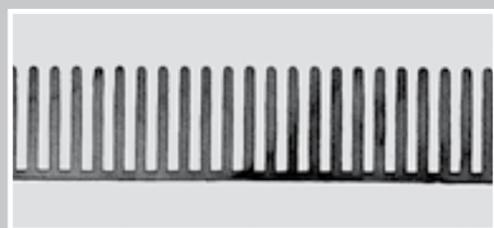


Рис. 21. Фрагмент ЗС из 3 пластин 0,1 мм.
Пазы: ширина — $0,05 + 0,005$ мм, длина — 0,7 мм.
Общее число пазов ЗС — 181

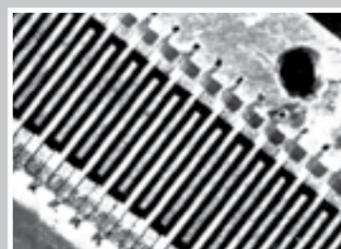


Рис. 22. Фрагмент сборной ЗС ЛОВ с пазами, вырезанными проволокой

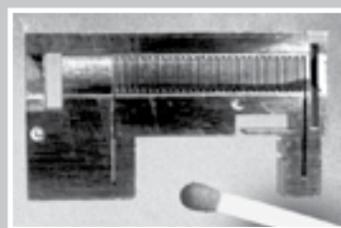


Рис. 23. Замедляющая система ЛОВ «Засечка».
Ширина пазов 0,12 мм.
Штыри: высота — 4 мм, ширина — 0,18 мм

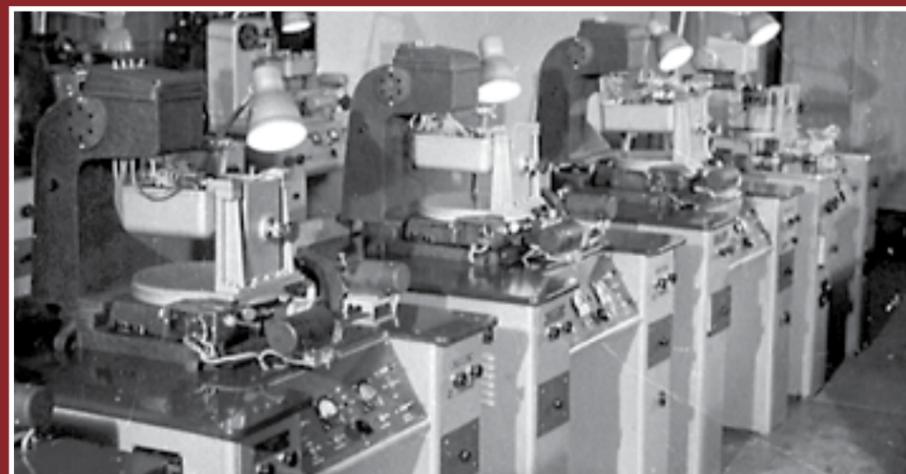


Рис. 24. Группа установок А 207.13

водящих щеток. На торце коллектора, изготовленного из меди, имелось 50 зубьев. Цена одного деления датчика — 0,01 мм. В качестве электромеханических счетчиков использовались шаговые искатели ШИ-25/4. Импульсы, возникающие в результате вращения коллектора, посылались в катушку шагового двигателя. Число импульсов задавалось на шаговых искателях посредством многопозиционных переключателей, позиции которых соответствуют числу ламелей шаговых искателей. В поперечном направлении величина перемещения устанавливалась микропереключателями.

В 1961 г. наибольшее количество замедляющих систем было изготовлено проволокой ВА-3 $\varnothing 25$ –40 мкм, примерно вдвое реже применялась проволока $\varnothing 15$ мкм. При этом величина межэлектродного зазора в зависимости от режима обработки (диаметра проволоки) составляла 1–5 мкм.

Как видно из графика на рис. 26, электроискровая обработка в те годы уже не являлась экзотикой, а использовалась в серийном производстве.

Таким образом, уже в середине 1950-х гг. была показана возможность широкого применения в электронной промышленности электроискрового способа обработки для изготовления нежестких деталей с точностью до нескольких микрометров и шероховатостью до десятых долей микрометра. Оказалось возможным изготовление деталей, размеры которых не превышают 5–6 мкм.



Рис. 25. Установка с программным управлением ЭКУП-1 для изготовления ЗС ЛОВ

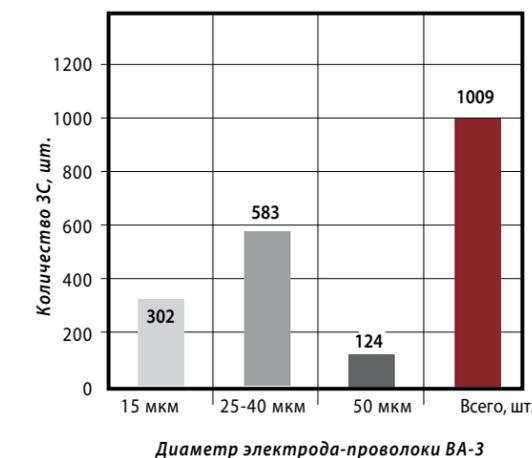


Рис. 26. Количество замедляющих систем, изготовленных в 1961 г. проволокой ВА-3 различных диаметров

5. Электроискровая технология изготовления магнетронов

Развитие электроискровой прецизионной обработки металлов также стимулировалось благодаря интенсивному росту выпуска магнетронов. Электроискровой способ впервые был применен для изготовления анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона длин волн (лопаточного типа или типа «восходящее солнце») в середине 1950-х гг. Использовался метод копирования профиля электрода-инструмента и вырезания профиля резонатора проволокой $\varnothing 0,03-0,04$ мм. При этом наибольший диаметр резонаторов составлял 20 мм, высота — от 2 до 5 мм, ширина ламелей — 0,1–0,5 мм. Число резонаторов — от 10 до 80. Время изготовления таких анодных блоков электродом-проволокой на экспериментальной установке без программного управления составляло от 2 до 6 ч при шероховатости обработанной поверхности $Ra \leq 0,5-1,2$ мкм. В качестве межэлектродной среды на первых порах использовался осветительный керосин.

На рис. 27, а показана первая экспериментальная установка для изготовления анодных блоков приборов М-типа миллиметрового диапазона длин волн, а на рис. 27, б — установка ЭКУ-1 с генераторами РС. Они изготавливались в середине 50-х гг. XX столетия на базе микроско-

па БМИ-1 (использовалось основание микроскопа с измерительным поворотным столом и фермой, а также набор концевых мер 2-го класса). Заготовка блока помещалась в оправке, которая была установлена на кронштейне, закрепленном на поворотном столе микроскопа и обеспечивающим поворот стола с точностью до $\pm 3''$. Координатный стол перемещался микрометрическими винтами с микронной точностью. Фрагмент полученного 10-резонаторного блока толщиной 4 мм ($D = 6,7$ мм, $d = 5,4$ мм, ламели: ширина — 0,4 мм, длина — 0,82 мм) изображен на рис. 28.

Анодные блоки — самые трудоемкие и ответственные детали современных магнетронов и амплитронов — изготавливаются преимущественно из бескислородной меди. Иногда их ламели армируются тугоплавкими металлами (вольфрамом или молибденом). Размеры анодных блоков приведены в табл. 2.

Для изготовления крупногабаритных анодов были созданы специальные установки — А207.19 (рис. 29) с генератором РС, А207.27 (рис. 30) и А207.33 (рис. 31) со встроенными тиратронными генераторами импульсов, обеспечивающими обработку материала в воде. Установки А207.33 оснащены приспособлениями для изготовления анод-



Рис. 27, а. Первая экспериментальная установка для изготовления анодных блоков приборов М-типа миллиметрового диапазона длин волн



Рис. 28. Фрагмент полученного 10-резонаторного блока толщиной 4 мм ($D = 6,7$ мм, $d = 5,4$ мм, ширина ламели — 0,4 мм, длина — 0,82 мм)



Рис. 29. Электроискровой станок А207.19 для изготовления анодных блоков приборов М-типа двумя проволоками



Рис. 30. Установка А207.27



Рис. 27, б. Установка ЭКУ-1 с генераторами РС

Таблица 2. Размеры анодных блоков

Параметр, обозначение и единица измерения	Величина
Наружный диаметр D , мм	20–120
Высота H , мм	20–135
Внутренний диаметр d , мм	3–35
Число резонаторов	10–80
Диаметр резонатора D_1 , мм	20–80
Высота ламели резонатора h , мм	2–115

ных блоков и тел вращения (например катодов) отточкой электродом-проволокой. Процесс изготовления деталей на А207.19 осуществлялся двумя проволоками из меди $\varnothing 0,1-0,2$ мм. Проволока с катушек 1 перематывается на катушку 2, направление задается твердосплавными вставками, закрепленными на скобе б. Каждая проволока натягивается независимо друг от друга с помощью соответствующих устройств. Величина натяжения обычно выбирается равной 0,6–0,8 от максимального разрывного усилия проволоки. Скорость перемотки регулируется от 0,12 до 1,5 м/мин.

Крупногабаритные анодные блоки амплитронов и магнетронов, изготовленные с применением двух проволок, представлены на рис. 32–34. В 9-резонаторном блоке амплитрона, представленном на рис. 33, вырезано только 7 резонато-



Рис. 31. Группа установок А 207.33 со встроенным тиратронным генератором импульсов и приспособлениями для изготовления анодных блоков, катодов и других деталей ЭП

ров. На фотографии видны параллельные пазы шириной 0,12 мм, выполненные двумя проволоками. После последовательного прорезания 9 пар пазов (образования 9 ламелей) одна из проволок обрывается. Затем осуществляется последовательное изготовление 9 резонаторов одной проволокой (за счет поворота стола) с удалением отходов. Применение двух проволок при вырезании обеспечивает абсолютную идентичность ламелей, наивысшую точность размеров по ширине и наилучшую чистоту обработанной поверхности при чрезвычайной простоте обработки.

На рис. 35 изображен анодный 20-резонаторный блок магнетрона «Анаконда» из меди МБ со вставкой из молибдена.

Внутренний диаметр резонаторов $d = 6$ мм, наружный $D = 10$ мм, высота ламелей — 10 мм.

На рис. 36 представлен миниатюрный анодный блок «Ромашка» с резонаторами. Внутренний диаметр — 0,5 мм, максимальный — 2,5 мм, наружный диаметр корпуса — 20 мм.

Сложнопрофильные ажурные элементы миниатюрных деталей электронных приборов М-типа для сборных блоков диаметром 20 мм представлены на рис. 37. Из таких элементов собирается анодный блок прибора.



Рис. 32. Анодный блок амплитрона «Салют», $D = 62$ мм, $d = 14$ мм. Ширина ламели – 4 мм, высота – 12 мм. Точность изготовления элементов 0,01 мм

Рис. 33. Анодный блок амплитрона. Высота 50 мм. $D = 62$ мм, $d = 14$ мм. Ламели – 4 мм. Вырезано 7 резонаторов

Рис. 34. Анодный блок. Ламели: ширина – 4 мм, высота – 82 мм, $d = 24$ мм, $D = 68$ мм



Рис. 35. Анодный 20-резонаторный блок магнетрона «Анаконда» из меди МБ со вставкой из молибдена



Рис. 36. 12-резонаторный анодный блок «Ромашка»: $d = 0,5$ мм, $D = 2,5$ мм, $h = 6$ мм



Рис. 37. Сложнопрофильные ажурные элементы миниатюрных деталей электронных приборов М-типа

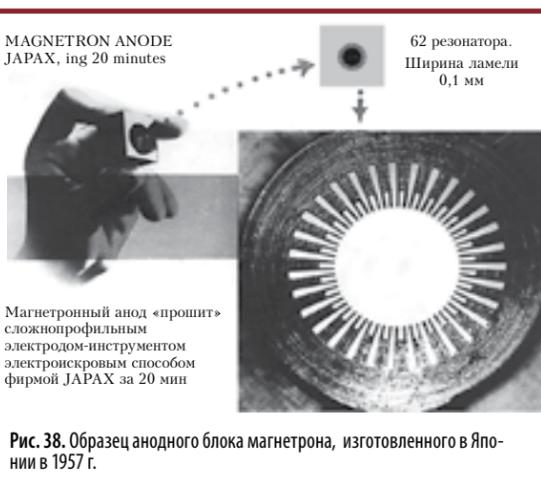


Рис. 38. Образец анодного блока магнетрона, изготовленного в Японии в 1957 г.

На рис. 38 показан образец анодного блока магнетрона, изготовленного в Японии в 1957 г. электроискровой «прошивкой» специальным электродом-инструментом из прессованного вольфрама, покрытого серебром.



Рис. 39. Федосеев А.П. Начальник отдела 140 НИИ-160. Фото 1956 г.



Рис. 40. Ставицкий Б.И. Руководитель группы электроискровой обработки отдела 140, 1954 г.

В начале 1950-х годов в связи с разработкой новых электровакуумных приборов миллиметрового диапазона длин волн, появилась необходимость в изготовлении небольших и ажурных деталей с высокой точностью (до 0,002 мм) медных, никелевых, молибденовых, вольфрамовых и других сеток клистронов. Медных и молибденовых замедляющих систем ламп обратной волны. Затем анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона длин волн, катодов из вольфрама, молибдена, гексаборида лантана и т. п. Поэтому такие детали и узлы стремились делать из достаточно прочных материалов, специальных сплавов и композиций, тугоплавких материалов и их карбидов, которые, как правило, трудно поддаются традиционным методам обработки.

С 1-го июля 1954 года я был переведен инженером в отдел 140, руководимый Федосеевым А.П. (рис. 39), который заинтересовался темой моей диссертации «Исследование возможности применения электроискровой обработки для из-

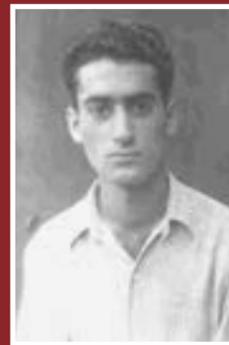


Рис. 41. Гуларян К.К. Выпускник Ереванского Политехнического Института, направленный в отдел 140.

готовления прецизионных деталей электровакуумных приборов». Он создал для проведения этих исследований, под моим руководством группу (рис. 40). В группу, исследования возможности применения электроискровой обработки для изготовления прецизионных деталей электровакуумных приборов, были направлены: выпускник Ереванского Политехнического Института (ЕПИ) Гуларян К.К. (рис. 41), выпускники Фрязинского электровакуумного техникума, ученицы средних школ, для освоения электроискрового способа изготовления анодных блоков и других деталей.

Ким Гуларян принимал участие в создании первого в мире макета электроискровой установки для изготовления анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона волн электродом-проволокой диаметром 0,03–0,04 мм на базе большого инструментального микроскопа МБИ-1 (рис. 42).

На фотографии: 1 - координатный стол, 2 - стойка, 3 - электродвигатель с катушкой 6 принимающей проволоку, катушка 5 с проволокой ВА-3, 7 - кронштейн с регулируемой направляющей проволоки и кронштейн 8 для закрепления изготавливаемых блоков магнетронов. На панели управления размещены приборы и органы управления (натяжения проволокой, напряжения на электродах и электрическим током). На фото не отмечено наличие двух сервоприводов с электродвигателями СЛ-161, использованных для перемещений координатного стола в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

На наклонной панели установки размещены органы управления: вольтметр и амперметр, а также лабораторный автотрансформатор и справа от них ручка регулирования балластного сопротивления.



Рис. 42. Первый в мире макет электроискровой установки для вырезания анодных блоков магнетронов миллиметровых волн электродом-проволокой диаметром 30–40 мкм.

На установке были изготовлены первые образцы анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона длин волн, увеличенные силуэты которых представлены на рис. 44-45.

Первые образцы анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона электродом-проволокой были уже изготовлены, но информация об их изготовлении была опубликована только после появления сведений об изготовлении подобных анодных блоков магнетронов японской фирмой Ярах методом электроискрового копирования («прошивки») профиля электрода-инструмента, изготовленного механическим способом из пористого вольфрама, пропитанного серебром.

Только после этого, главный инженер Акулин М.С. разрешил публикацию в журнале Труды НИИ МРТП СССР статьи об этом.



Рис. 43. Главный корпус НИИ-160, на этаже, которого (выделено прямоугольником), располагалась с 1957 по 1960 год электроискровая лаборатория.

В ноябре 1956 г. я окончил аспирантуру, отчитался по проделанной работе, которая была рекомендована к официальной защите. Мой научный руководитель - Лазаренко Б.Р. в это время (с 16 ноября 1955 г.) находился в длительной командировке в КНР. Он – заместитель академика секретаря Отделения технических наук АН СССР, директор ЦНИЛ-Электром, был туда направлен АН СССР в качестве советника при президенте АН КНР. Там он участвовал в разработке детального плана развития науки КНР, обеспечивая связь с АН СССР. Кроме того, он знакомил китайскую инженерно-техническую общественность с возможностями электроискровой техники, оказывал содействие во внедрении её в производство страны, стимулировал создание Пекинского института электроискровой обработки материалов. Поэтому я решил отложить официальную защиту диссертации до его возвращения. ЦНИЛ-Электром АН СССР, находилась в Люблино, рядом с железнодорожной платформой станции Перерва, в быв-



Рис. 44. 20-ти резонаторный анодный блок:
ширина ламели 0,4 мм,
диаметры: 1) 5,5 мм, 2) 12 мм, 3) 17 мм, высота 3,6 мм

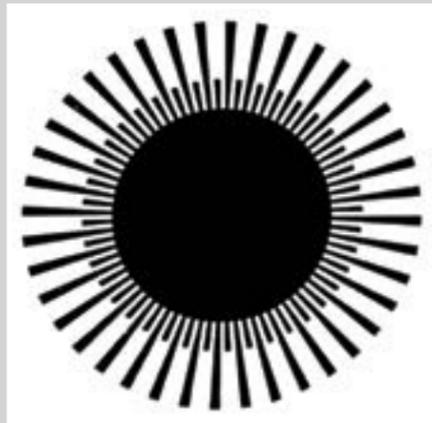


Рис. 45. 80-резонаторный анодный блок:
ширина ламели ~ 0,17 мм,
диаметры: 1) 8,4 мм, 2) 10,7 мм, 3) 15,2 мм, высота 2,3 мм.

шем Перервинском монастыре. Её адрес – Люблино, Шоссейная улица, 92.

Будучи еще в КНР, Борис Романович обращался к директору НИИ-169 М.М. Фёдорову с просьбой направить меня на полгода в КНР для участия в становлении Пекинского Института Электроискровой Обработки Материалов. Однако, в связи с ухудшившимися отношениями с КНР, из-за выступления на XX-ом съезде КПСС Н.С. Хрущёва с докладом о культе личности И.В. Сталина, эта моя командировка, к счастью, не состоялась. А Б.Р. Лазаренко вскоре досрочно вернулся.

Лаборатория электроискровой обработки материалов была создана 12 марта 1957 года, в соответствии с приказом директора НИИ-160 Фёдорова М.М. в составе экспериментального отдела ОКБМ и размещалась в центре третьего этажа главного корпуса (рис. 43). В начале 1957-го года этот корпус и расположенные вокруг главного корпуса института деревья имели иной вид. От центральной проходной располагались кусты цветущих роз, подобно которым были, пожалуй, только такие же, что украшали центральный вход на ВДНХ возле фонтана «Дружба народов». Тогда оформлению ландшафта института, его облику, дирекция уделяла большое внимание.

Экспериментальный отдел ОКБМ возглавлял Лебедев Н.А.. С ним я познакомился ещё в Саратове во время его приезда на завод электронного машиностроения, когда он и Марчук Т.И. агитировали молодых специалистов поступать в аспирантуру НИИ-160.

Приказом было предусмотрено сосредоточение всех работ, проводимых в институте по электроискровой тематике в созданной лаборатории и переводе в неё сотрудников, занятых в этих работах из других подразделений. Состоялось перемещение, предусмотренных приказом сотрудников подразделений, занимающихся электроискровой обработкой с соответствующим оборудованием на выделенные лаборатории площади (510 м²) в новом корпусе...

Вырезание анодных блоков миллиметрового диапазона волн осуществлялось вольфрамовой проволокой ВА-3 диаметром 0,03-0,04 мм при ручном управлении, требовавшего исключительной внимательности при изготовлении экспериментальных образцов таких блоков и осуществлялось молодыми работницами.

На установке ЭКУ-1 в феврале 1954 г. были изготовлены первые образцы анодных блоков миллиметрового диапазона длин волн из хромистой меди. Их изготовление осуществлялось проволокой ВА-3 Ø 30 мкм выпускницей фрязинской школы Наталией Шуклиной, успешно освоившей эту технологию практически без автоматизации процесса. Первый 20-ти резонаторный анодный блок был изготовлен 9 февраля 1957 г. проволокой из вольфрама ВА-3 диаметром 30 мкм (рис. 44).

На рис. 44 20-ти резонаторный анодный блок магнетрона миллиметрового диапазона ширина ламели 0,4 мм, диаметры: 1) 5,5 мм, 2) 12 мм, 3) 17 мм; высота 3,6 мм. На рис. 45 показан

80-резонаторный анодный блок миллиметрового диапазона: ширина ламели ~ 0,17 мм, диаметры: 1) 8,4 мм, 2) 10,7 мм, 3) 15,2 мм, высота – 2,3 мм. Он тоже был изготовлен Наталией Шуклиной.

И хотя первые анодные блоки были миниатюрных размеров, они предвещали наступление новой эры в производстве деталей электронных приборов. Важной особенностью способа являлось то, что для осуществления этой удивительной технологии не требовалось изготовления какого-либо сложнопрофильного инструмента, так как его роль выполняла тончайшая проволока, диаметр которой меньше толщины волоса блондина. При этом применение проволоки Ø 0,02-0,04 мм сулило перспективу изготовления деталей с минимальным превращением металла в «стружку», так как ширина образующегося при этом паза ничтожно мала. При использовании в качестве электрода инструмента вольфрамовой или молибденовой проволоки, применялись электрические импульсы малой энергии (меньше 0,001 Дж) микросекундной длительности (до 1 мкс), что обеспечивало высокое качество деталей.

С момента создания Электроискровой лаборатории, преобразованной затем в Отдел электрических методов, директор НИИ-160 М.М. Фёдоров постоянно уделял внимание развитию этого направления, поскольку верил в его возможности совершенствования технологических процессов изготовления электровакуумных приборов.



Рис. 46. Анодный блок «Анаконда» из меди со вставкой из молибдена. Внутренний диаметр 6 мм, наружный 10 мм, высота ламелей – 10 мм.

Ему вместе с Б.И. Ставицким и Е.В. Холодновым в 1963 году за разработку новых методов изготовления особоточных деталей была присуждена Ленинская премия.

На рис. 46 изображен анодный 20-резонаторный биметаллический блок магнетрона «Анаконда» из меди МБ со вставкой из молибдена. Внутренний диаметр резонаторов $d = 6$ мм, наружный $D = 10$ мм, высота ламелей – 10 мм.

Большие трудности в свое время возникли при создании изделий с катодами из такого трудно поддающегося традиционным методам обработки материала, как борид лантана (LaB_6). Для их изготовления наиболее целесообразным оказалось применение электроискровой обточки электродом-проволокой с использованием специальной оснастки.

На рис. 47 в качестве примера показаны катоды двух типоразмеров из борид лантана: Ø 16 мм с вогнутым сферическим торцом $R = 16$ мм и Ø 4–5,4 мм с вогнутым сферическим торцом $R = 3,5$ мм.



Рис. 47. Катоды из борид лантана LaB_6 :
а) Ø 16 мм,
торце — сфера $R = 16$ мм;
б) Ø 4–5,4 мм,
торце — сфера $R = 3,5$ мм



Рис. 48. Схемы изготовления катодов электродом-проволокой:

а) обточка заготовки;
б) формообразование сферических поверхностей на торце;
в) отрезание на установках типа А207.33

Схемы изготовления таких катодов электродом-проволокой показаны на рис. 48:

- а) обточка заготовки;
 - б) формообразование сферических поверхностей на торце;
 - в) отрезание на установках типа А207.33.
- Во всех случаях заготовка катода вращается с небольшой скоростью, а проволока направляется соответствующими устройствами.

Электроискровая технология с применением электрода-проволоки упростила создание магнетронов в сантиметровом и дециметровом диапазонах (в частности, с быстрой перестройкой и малыми уходами частоты от импульса к импульсу в средней части сантиметрового диапазона). Эти магнетроны, а также усилители М-типа — амплитроны — позволили создать высокоэффективные подвижные доплеровские РЛС ПВО страны и аналогичные корабельные РЛС. При этом по своим параметрам магнетроны и амплитроны, на базе которых были созданы первые в СССР РЛС системы ПРО (противоракетной обороны), долго оставались непревзойденными.

6. Использование особо точных методов электроискровой обработки в производстве сувениров и ювелирной промышленности

Новые способы изготовления прецизионных деталей электродом-проволокой и методами последовательного копирования использовались для изготовления различных сувениров, которые должны были показать широкой публике практически неограниченные возможности электроискрового способа. На рис. 49 показан сложный профиль, полученный на поверхности шарика подшипника $\varnothing 24$ мм электродом-проволокой $\varnothing 0,04$ мм. Буквы «СССР» и звездочка, вырезанные в шарике, могут легко перемещаться.

Блестящим доказательством неограниченных возможностей этого способа обработки в свое время стало прорезание электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 0,04$ мм узоров в лезвиях для безопасной бритвы толщиной 0,05–0,1 мм (рис. 50).

На рис. 51 представлены образцы сувениров с изображениями на полированной поверхности литого магнитного сплава, ЮНДК, который, как известно, отличается хрупкостью и плохо режется. Они обработаны двумя проволочными электродами, расположенными под углом 70–80° друг к другу. Глубина отпечатков 0,1–0,15 мм. Ширина линий автографов



Рис. 49. Сложный рельеф, полученный на поверхности шарика подшипника $\varnothing 24$ мм электродом-проволокой $\varnothing 0,04$ мм

не более 0,06 мм. Они выполнены специальным электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 0,04$ мм. На рис. 52 представлен сувенир из яшмы, полированная поверхность которой инкрустирована тонкими пластинами из хромистой меди толщиной 0,5 мм, вырезанными электродом-проволокой $\varnothing 0,04$ мм.

Следует отметить, что поверхность, полученная электроискровым способом, представляет собой совокупность перекрывающихся друг друга лунок, каждая из которых образована



Рис. 50. Прорези в лезвиях для безопасной бритвы толщиной 0,06 мм



Рис. 51. Сувениры с изображениями на полированной поверхности литого магнитного сплава, ЮНДК



Рис. 52. Сувенир из яшмы с инкрустацией из пластин хромистой меди толщиной 0,5 мм, вырезанных электродом-проволокой Ø 0,04 мм

электрическим разрядом. Поэтому она — матовая и не имеет зеркального блеска. Параметры лунок, следовательно, и декоративные свойства поверхности можно изменять, регулируя режимы обработки. Это свойство поверхности пер-



Рис. 53. Колье «Знаки зодиака»

воначально использовалось при изготовлении различных сувениров (а в дальнейшем — при изготовлении формообразующих поверхностей пресс-форм и чеканочных штампов). Для увеличения контрастности изображения на полированную поверхность до электроискрового нанесения рисунка иногда наносят различные тонкие цветные покрытия: воронение, золочение, — а также различные вещества (нитрид титана). В этом случае полученная электроискровым способом поверхность становится матовой (цвета материала заготовки), а остальная поверхность остается зеркальной.

Электроискровым методом изготавливались различные украшения, например кольца. Отличительная особенность таких изделий, полученных электроискровой вырезкой, от аналогов, изготовленных штамповкой или литьем, состоит в том, что они имеют острые кромки по всему периметру вырезанной фигуры, что придает им более четкие очертания. На рис. 53 показаны элементы кольца «Знаки зодиака», вырезанные электродом-проволокой в заготовках из нержавеющей стали Ø 22 мм, поверхность которых была предварительно отполирована и покрыта нитридом титана.

7. Тиратронный и транзисторный генераторы — шаг вперед в развитии электроискровой технологии

Исследования и поиск оптимальной межэлектродной среды

В течение почти 10 лет после появления в 1954 г. первых экспериментальных электроискровых установок с электродом-проволокой широкому внедрению этого оборудования при изготовлении сложнопрофильных деталей средних и больших размеров (особенно в инструментальном производстве) мешали 2 основные причины:

- ♦ отсутствие систем ЧПУ на базе мини- или микро-ЭВМ, обладающих широкими возможностями управления оборудованием, высокой надежностью и помехоустойчивостью, а также простотой расчета управляющих программ;
- ♦ недостаточная производительность процесса при изготовлении стальных деталей (в связи с использованием керосина в то время в качестве межэлектродной среды).

Первая проблема была в какой-то степени решена в середине 1970-х гг. с появлением мини-ЭВМ, а затем микро-ЭВМ и систем ЧПУ на их базе. Вторая нашла свое решение рань-

ше, чем первая: в СССР в середине 1960-х гг. создали специальные тиратронные генераторы биполярных импульсов напряжения микросекундного диапазона длительности с энергией в несколько сотых долей джоуля и нулевой составляющей напряжения на электродах. Такие импульсы обеспечивают возникновение между электродами искровых разрядов высокой удельной мощности с амплитудами тока, достигающими 500 А при длительности импульса не более 1,5 мкс. **В тиратронном генераторе была применена идея концентрации энергии в конденсаторах, а для ее передачи к электродам использован импульсный трансформатор, устранивший необходимость гальванической связи источника питания с электродами станка. Применение этих генераторов позволило использовать в качестве межэлектродной среды вместо керосина обычную воду (без ее очистки и деионизации).**

По сравнению с углеводородными средами (например керосином) вода отличается более высокой безопасностью при электроискровой обработке, отсутствием вредных паров, твердых продуктов разложения среды, науглероживания и загрязнения обрабатываемых

поверхностей, что недопустимо при изготовлении деталей электронных приборов. Однако вода — слабопроводящая жидкость, которая при пропускании через нее постоянного тока электролизуется, выделяя водород и кислород. Протекание в ней постоянного тока вызывает активные электрохимические процессы анодного растворения вследствие того, что она — слабый электролит. Результатом этих процессов является повышенная коррозия деталей и электродов, повреждение обработанных поверхностей, ухудшение точности обработки и изменение химического состава поверхностных слоев заготовок.

Для выяснения возможности замены керосина, используемого при электроискровой обработке деталей ЭВП, на другие межэлектродные среды, содержащие меньше углеводородов, было осуществлено разрезание штабиков из прессованного вольфрама ВТ-15 электродом-проволокой ВА-3 0,03 мм в растворе этанола в воде. Полученные значения скорости разрезания штабиков 4,67 мм²/мин ($S = 17 \text{ мм}^2$) при скорости перемотки проволоки 14 мм/с и расстоянии между токоподводящими роликами 17 мм на режиме: $U_0 = 110 \text{ В}$, $U_1 = 90 \text{ В}$, $I_{к.з} = 0,45 \text{ А}$ в зависимости от содержания этанола в воде представлены на рис. 54.

Из графиков следует, что с увеличением процентного содержания этанола в воде с 0 до 10 скорость резания возрастает в 2,36 раза, при увеличении с 10 % до 35 % — еще в 1,26 раза, а при 40 % содержании этанола в воде скорость достигает максимума, увеличиваясь по сравнению с резанием в воде в 3 раза. Однако при концентрации этанола в воде в диапазоне 40 – 100 % скорость уменьшается в 2,5 раза, превышая скорость разрезания в чистой воде всего на 21 %.

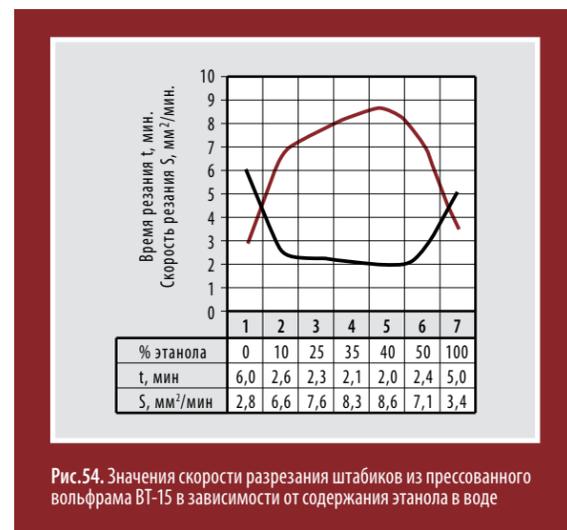


Рис. 54. Значения скорости разрезания штабиков из прессованного вольфрама ВТ-15 в зависимости от содержания этанола в воде

Авторы электроискрового способа еще в своих ранних работах отмечали, что «практически далеко не безразличен выбор состава жидкой среды, применяемой при размерной электроискровой обработке металлов».

Жидкость, являющаяся межэлектродной средой, должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- ♦ иметь незначительную вязкость;
- ♦ не выделять в процессе работы ядовитых паров и газов;
- ♦ быть не горючей;
- ♦ не дорогой;
- ♦ химически нейтральной к материалу электродов;
- ♦ не терять во время работы своих основных свойств.

Очевидно, что, за исключением особых случаев, все эти свойства в самой большой степени имеет обычная промышленная вода. Она практически была бы наилучшей межэлектродной средой, если бы были созданы генераторы электрических импульсов, толчком подающие на электроды строго дозированную порцию энергии в заданные интервалы времени, оставляя все прочее время электроды без напряжения.

Устройствами, удовлетворяющими этим требованиям к эффективности электроискровой обработки, стали новые транзисторные и тиратронные генераторы биполярных импульсов напряжения, созданные в начале 1960-х гг. в электронной промышленности СССР. Благодаря им была обеспечена возможность прецизионного изготовления деталей в обычной воде, что позволило существенно повысить производительность процесса, его точность, а также улучшить качество обрабатываемой поверхности и условия труда. Создание генераторов биполярных импульсов напряжения микросекундной длительности строго определенной формы позволило практически исключить нежелательные электрохимические процессы. При этом в ходе исследований выяснилось, что для прецизионной электроискровой обработки в воде наиболее приемлемые холостые биполярные импульсы напряжения имеют прямоугольную форму без постоянной составляющей, причем положительная амплитуда не менее чем в 2 раза должна превосходить отрицательную, а длительность — находиться в пределах 3–4 мкс. Это, в частности, обусловлено тем, что для получения обработанной поверхности с шероховатостью $Ra \leq 1 \text{ мкм}$ оптимальными являются те токовые импульсы, которые не только удаляют максимальное количество материала за один импульс, но и обеспечивают его вы-

мывание в мелкодисперсной фазе. При этом формируемая поверхность покрыта лунками сферической формы без застывших выплесков жидкого металла. Это возможно при удалении материала в парообразной форме, для чего необходимо уменьшать длительность импульсов тока, чтобы увеличить долю энергии импульса, идущей на перегрев и испарение вещества.

Благодаря применению тиратронных генераторов биполярных импульсов напряжения удалось:

- ♦ существенно повысить производительность процесса (например, при изготовлении стальных деталей — на порядок);
- ♦ исключить загрязнение обрабатываемых поверхностей углеродом и смолистыми отложениями, неизбежно возникающими при применении в качестве межэлектродной среды керосина или других углеводородных жидкостей;
- ♦ улучшить условия труда, свести к минимуму пожароопасность оборудования и исключить необходимость ограждения электродов, чтобы предотвращать поражение операторов электрическим током.

Тиратронные генераторы импульсов

Работы по применению воды вместо керосина были проведены в НИИ-160 под руководством В.Л. Кравченко, сумевшего собрать в начале 1960-х гг. группу единомышленников: Н.Г. Шубина, Г.А. Жукова, Г.Г. Семина и др.

В течение примерно 10 лет оставалась серьезной и казалась неизбежной проблема применения в качестве межэлектродных сред при изготовлении деталей приборов СВЧ жидких углеводородов. Коллективу ученых и производственников НИИ-160 удалось полностью решить их замену на воду к середине 1960-х гг. Были созданы экспериментальные конструкции тиратронных генераторов импульсов с импульсными трансформаторами на базе тиратронов, разработанных в НИИ-160, которые позволили вести электроискровую обработку материалов в обычной воде из водопровода без ее очистки и деионизации. При этом электроискровой процесс осуществлялся не только с подачей воды в зону обработки, но и с полным погружением обрабатываемой детали в ванну, без боязни возникновения электрохимических процессов в зоне обработки. Кроме того, обработку можно было выполнять не только при изготовлении деталей электродом-проволокой, но и успешно осуществлять операции «прошивки».

На рис. 55 представлена принципиальная схема тиратронного генератора импуль-

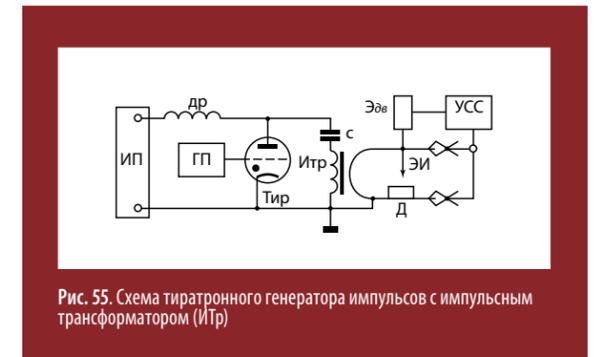


Рис. 55. Схема тиратронного генератора импульсов с импульсным трансформатором (ИТр)

сов с импульсным трансформатором. Конденсатор «С» заряжается через дроссель «Др» от источника высоковольтного питания «ИП». После этого на сетку тиратрона «Тир» подается импульс поджига от генератора поджигающих импульсов «ГП». Тиратрон отпирается, и конденсатор «С» разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора «ИТр». Импульс напряжения, индуктируемый во вторичной обмотке, возбуждает искровой разряд между электродом-инструментом «ЭИ» и деталью «ЭД». Сигнал от искрового промежутка подается на вход усилителя следающей системы «УСС», с выхода которого напряжение подается на электродвигатель «ЭДв» привода электрода-инструмента.

На рис. 56 — экспериментальные образцы тиратронного генератора (а) и экспериментальной установки (б) для изготовления деталей копированием профиля электрода-инструмента с импульсным трансформатором, встроенным в ванну.

Кроме того, другой импульсный трансформатор встроен в корпус генератора. Выводы вторичной обмотки трансформатора находятся сверху справа корпуса генератора. На рис. 57 — двухпозиционная установка 207.05, одна из головок которой подключена к выводам импульсного трансформатора, встроенного в генератор.

Для уменьшения потерь энергии при передаче ее к электродам, а также значительного уменьшения габаритов генераторы импульсов вместе с импульсными трансформаторами стали встраивать в установки, при этом значительно сокращая габариты.

Тиратронные генераторы импульсов позволили повысить производительность процесса при шероховатости обработанной поверхности $Ra \leq 2,5 \text{ мкм}$:

- ♦ при вырезании деталей электродом-проволокой — в 2–3 раза;
- ♦ при изготовлении деталей методом копирования — в 5–10 раз.

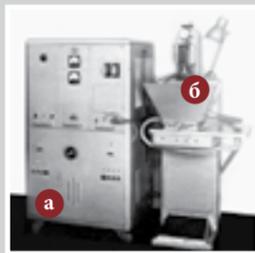


Рис. 56. Тиратронный генератор (а) и установка для прошивки (б) с вставным импульсным трансформатором

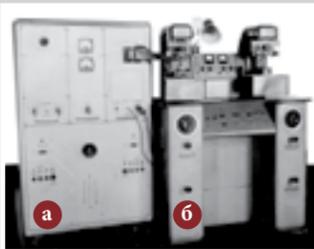


Рис. 57. Тиратронный генератор (а) со встроеным импульсным трансформатором, подключенный к установке А207.05 (б)



Рис. 58. Медные коронки для настройки: $\varnothing \approx 35$ мм: а) заготовка; б) деталь; в) отходы

Благодаря этому стало возможно электроискровое изготовление двумя проволоками анодных блоков и других деталей магнетронов и амплитронов сантиметрового диапазона волн, а также деталей коронок для настройки частот (рис. 58).

В создание тиратронных генераторов наибольший вклад внес Н.Г. Шубин, осуществлявший разработку вариантов их схем, компоновку основных узлов, их монтаж и настройку.

Транзисторные генераторы импульсов

Вслед за тиратронными генераторами с импульсными трансформаторами создаются оригинальные транзисторные генераторы импульсов, которые так же, как и тиратронные, обеспечивают формирование биполярных импульсов напряжения без постоянной составляющей. Они также позволяли в качестве межэлектродной жидкости использовать обычную воду с проводимостью 50–100 мк·См. На рис. 59 — один из таких генераторов для изготовления особо точных деталей электронных приборов.

На рис. 60 изображена установка А207.44 со встроеным малогабаритным транзисторным генератором.

При обработке стали Х12 М электродом-проволокой $\varnothing 0,15$ мм транзисторный генератор этой установки, при прочих равных условиях, обеспечивал ту же или даже несколько большую скорость формообразования по сравнению с тиратронным генератором импульсов — при меньшей шероховатости обработанной поверхности и значительно меньшей величине микрозаусенцев. Скорость формообразования деталей из магнитных сплавов



Рис. 59. Транзисторный генератор импульсов для изготовления особо точных деталей электронных приборов



Рис. 60. Установка А207.44 со встроеным малогабаритным транзисторным генератором



Рис. 61. Установка А207.40 со встроеным тиратронным генератором импульсов

ЮНДК и твердых сплавов была в 1,5–2,5 раза выше.

В создании таких генераторов принимали участие сотрудники лаборатории источников питания Ю.Т. Пушков, А.К. Голубков, С.В. Конушин и др.

Некоторые применяемые даже сегодня за рубежом так называемые «биполярные импульсные системы» для электроискровой обработки деталей в воде — например Super BS — не исключают полностью возникновения электролитической эрозии и коррозии. Кроме того, как следует из рекламных проспектов, эта система обеспечивает шероховатость обработанной поверхности R_{\max} за один проход не менее 20 мкм, что соответствует $Ra > 5$ мкм. Шероховатость $Ra = 2$ мкм может быть достигнута только при двух проходах. А электроискровое оборудование, созданное советской электронной промышленностью, обеспечивает формообразование деталей с шероховатостью поверхности $Ra = 2$ мкм за один проход — причем при использовании в качестве межэлектродной среды обычной воды из водопровода (без осуществления ее дополнительной очистки и деионизации).

Рассмотрим ниже некоторые результаты, к которым пришли отечественные исследователи в ходе разработки научных основ технологии прецизионной электроискровой обработки, а также при создании образцов техники, оптимальным образом реализующей эти подходы.

Среди созданного в середине 1960-х гг. электроискрового оборудования следует отметить модификацию экспериментальной координатной установки А207.30 — модель А207.40 со встроеным тиратронным генератором импульсов (рис. 61). Она была спроектирована на оригинальной базе, оснащена комплектом сменных приспособлений для разрезания деталей на пластины и выполнения щелей с помощью непрерывно обновляющейся тонкой проволоки. По своим технико-экономическим показателям установка превосходила все ранее известные аналоги (при $Ra \leq 3,2$ мкм). Благодаря применению тиратронного генератора с оригинальным импульсным трансформатором, рациональной компоновке основных функциональных блоков, а также другим удачным конструктивным решениям было достигнуто увеличение производительности и качества обработки, улучшены условия эксплуатации и исключена возможность поражения оператора электрическим током. Потребляемая мощность не превышала 2 кВт·А, а вес — 450 кг.

Электроискровая установка модели А207.30, поставленная итальянской фирме



Рис. 62. Установка серии А207.07



Рис. 63. Установка серии А207.08



Рис. 64. Деталь, изготовленная с помощью специального комплекта электрода-инструмента, состоящего из нескольких медных пластин толщиной 4 мм



Рис. 65. Электроискровые координатные установки А207.16, созданные на базе большого инструментального микроскопа БМИ-1 для изготовления деталей методом «прошивки»



Рис. 66. Образец слядного изолятора (а) и пуансон-матрицы штампов для изготовления деталей электровакуумных пальчиковых ламп из сляды (б, в)



Рис. 67а. Деталь, изготовленная на установках А207.12 (А207.23) с оптическими делительными головками



Рис. 67б. Деталь, изготовленная на установках А207.12 (А207.23) с оптическими делительными головками с использованием метода «прошивки»



Рис. 70. Расточенные вкладыши кондукторов:
а) стальной;
б) твердосплавный из ВК-6



Olivetti controllo numerico (OCN), позволила успешно решить проблему изготовления штампов перфораторов.

Ее применение на порядок подняло производительность процесса и дало возможность отказаться в те годы от использования малопродуктивных электроискровых станков фирмы AGIE и керосина в качестве межэлектродной среды, заменив его водой из водопровода.

Главное — была исключена слесарная доводка стальных направляющих пуансонов и матриц штампов из твердого сплава. В результате вместо 1,5 ч, которые уходили только на электроискровую прошивку матрицы, благодаря применению установки А207.30 на полную обработку штампа и направляющей для пуансонов стали затрачивать не более 15 мин.

На установках А207.07 и А207.08 (рис. 62 и 63) изготавливали пуансоны для холодного выдавливания анодных блоков магнетронов и инструменты методами «обратного» и последовательного копирования, которые обеспечивали минимальную площадь зоны взаимодействия электродов.

С помощью специального электрода-инструмента, состоящего из нескольких медных пластин толщиной 4 мм, была изготовлена оригинальная деталь (рис. 64) Ø 80 мм из жаропрочного сплава с внутренним сложным профилем из 12 элементов с Ø 10 мм (глубина отверстия — 60 мм). Очевидно, что ни одним из существующих способов такую деталь, имеющую закрытый профиль, изготовить невозможно.

На рис. 65 представлена группа электроискровых координатных установок А207.16, созданных на базе большого инструментального микроскопа БМИ-1, для изготовления деталей методом «прошивки». Характерные детали, обрабатываемые на этих установках, — пуансон-матрицы штампов для изго-



Рис. 68. «Прошивка» отверстий в детали, изображенной на рис. 60, на установке А207.12

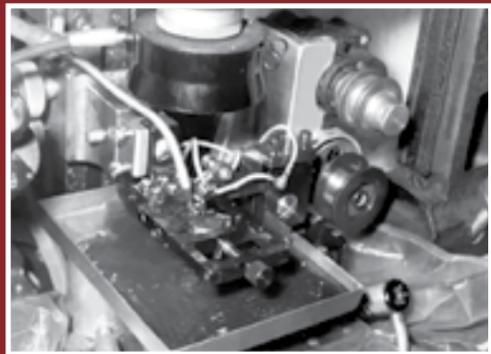


Рис. 69. Расточка электродом-проволокой кондукторных вкладышей на установке А207.12



Рис. 71. Изготовление медной проволокой Ø 0,15 мм твердосплавной матрицы вырубного штампа

товления из слюды изолятора электровакуумных пальчиковых ламп (рис. 66).

Пуансон-матрица изготавливалась из стали марок ХВГ или Х12 М и соответствовала профилю штампуемого слюдяного изолятора. Толщина матрицы обычно не превышала 4–5 мм, высота рабочей части ее сквозного отверстия — 2,5–3 мм. Размеры миниатюрных отверстий не должны были иметь отклонений от номинала более 3 мкм. Изготовление таких матриц механическим способом представляло собой весьма трудоемкий процесс, требующий исключительно высокой квалификации слесаря.

На установках А207.12 (А207.23) с оптическими делительными головками изготавливались детали типа тех, которые изображены на рис. 67а, б. На рис. 68 отображен момент «прошивки» 180 отверстий в детали, приведенной на рис. 67а, а на рис. 69 — расточка электродом-проволокой кондукторных вкладышей на той же установке с использованием специального приспособления.

На рис. 70 приведены расточенные вкладыши кондукторов: стальной и твердосплавный из ВК-6. Высота вкладышей — 8 мм. Отверстия Ø (1,5–3) + 0,002 мм. Рядом — отходы. Точность расположения отверстий по углу ± 5°. Шероховатость обработанной поверхности $Ra = 0,4–0,8$ мкм.

Наряду с появлением первых электромеханических систем программного управления с использованием шаговых искателей были разработаны и схемы копирования сложнопрофильных деталей с металлических шаблонов с помощью маломощных искровых разрядов. На рис. 71 продемонстрирован момент изготовления медной проволокой Ø 0,15 мм твердосплавной матрицы толщиной 6 мм для вырубного штампа, предназначенного для изготовления пластин ротора электродвигателя.

Эта схема получила практическое применение в разработанной ЦНИЛ-Электром АН СССР электроискровой установке «Электром-15» (после передачи ЦНИЛ-Электром в систему Министерства станкостроения и инструментальной промышленности СССР она получила обозначение «4531»).

Нужно отметить, что все эти достижения разработчиков электроискровых технологий представляли собой не единичные опытные экземпляры — они активно и очень широко внедрялись в серийное производство. Более чем на 20 предприятиях электронной промышленности в 1960-е гг. были созданы специализированные электроискровые цеха и крупные производственные участки для изготовления деталей приборов и инструментов (рис. 72, 73).

Количество электроискрового прецизионного оборудования, выпущенного НПО «Исток» и другими предприятиями МЭП СССР, на отдельном заводе могло достигать полутора сотен единиц. А общее количество этих установок в отрасли превысило 1000. С их помощью ежегодно изготавливались миллионы деталей электронных приборов 15000 наименований. Создавались отделы и лаборатории электроискровой обработки материалов с опытом производственных участков. Координация их работы осуществлялась специализированным Советом по новым методам обработки материалов ВПК.

Подробнее об этом читайте в главах 9 и 14.



Рис. 72. Электроискровой участок предприятия в г. Малино Житомирской обл.: около 90 единиц оборудования более 10 наименований



Рис. 73. Электроискровой участок инструментального цеха завода «Рений» в г. Фрязино Московской обл.

8. Физическая сущность электроискровой эрозии и принципы эффективного формообразования

В результате постоянных исследований и внедрения технологии электроискровой обработки в реальное производство ученые смогли изучить и подробно описать физическую сущность процессов, происходящих при электроискровом воздействии на металлы.

В ходе развития электроискровых технологий в работах многих авторов достаточно долгое время много внимания уделялось исследованиям электрической эрозии электродов при искровых и импульсных дуговых разрядах большой энергии: главным образом, в пределах от десятых долей или единиц до нескольких десятков или даже сотен джоулей и длительностью от единиц до сотен микросекунд. Широкая область искровых разрядов малых энергий и длительностей (от миллионных до сотых долей джоуля и от десятых долей до единиц микросекунд) оказалась практически не изученной. Но именно в этой области таились возможности создания принципиально новых методов формообразования поверхностей и технологических процессов особо точного изготовления изделий, например, деталей электронных приборов из таких материалов, как медь и ее

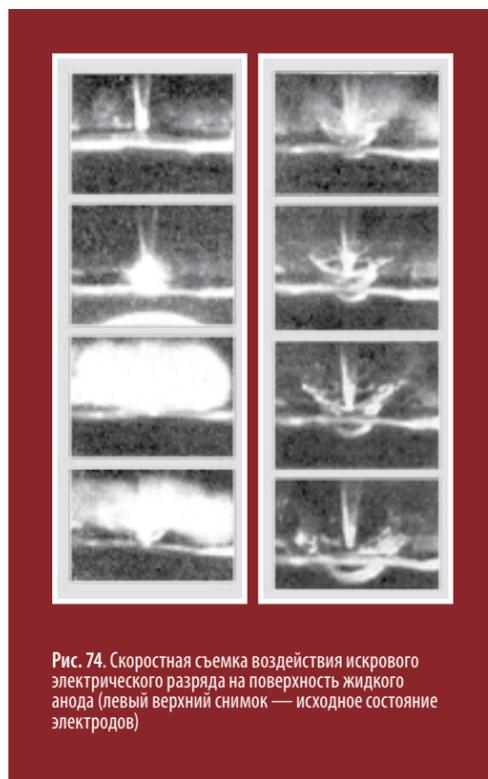


Рис. 74. Скоростная съемка воздействия искрового электрического разряда на поверхность жидкого анода (левый верхний снимок — исходное состояние электродов)

сплавы, тугоплавкие металлы и сплавы, полупроводниковые материалы. К изучению разрядов данного диапазона энергии вернулись лишь в конце 30-х гг. прошлого столетия в связи с открытием электроискрового способа обработки металлов, т. е. когда была выяснена возможность использования коротких импульсов электрического тока для размерной обработки металлов.

Было установлено, что для размерной электроискровой обработки пригодны только импульсы тока:

- ♦ длительностью не более 10^{-4} с, если электроды один относительно другого неподвижны, а межэлектродная среда непроточна;
- ♦ длительностью до 10^{-3} с, если электроды в процессе прохождения импульса перемещаются или среда, заполняющая межэлектродное пространство, непрерывно и с большой скоростью заменяется новой.

Электрические импульсы, длительность которых превышает названный предел, не пригодны для осуществления размерной обработки, поскольку в этом случае происходит сильное оплавление электродов.

Разработка специальных методов измерений (эрозиографический метод, рентгеноимпульсная съемка, пьезоэлектрический метод измерения силы удара электронов и др.) позволила накопить обширный экспериментальный материал, показавший несовершенство прежних объяснений механизма искровой электрической эрозии металлов. Так, предположение Б.Р. и Н.И. Лазаренко о селективном перемещении расплавленного участка под действием больших плотностей тока противоречило данными рентгеноимпульсной съемки, из которой видно, что отделение металла от анода происходит в отсутствие электрического поля.

Теория Б.Р. Золотых, в соответствии с которой выброс металла из расплавленной лунки происходит в результате вакуума, образовавшегося в межэлектродном пространстве, не объясняет, почему жидкая фаза — металл, имеющая температуру кипения на целый порядок большую, чем другая жидкая фаза — керосин, должна заполнить вакуум.

Теоретические обоснования Е.М. Вильямса, опирающегося главным образом на расчет процессов, возникающих в межэлектродном пространстве, вообще не согласуются с большинством экспериментальных данных. Все это вызвало необходимость не только пересмотреть существо имеющихся теорий, но и для нахождения некоторых аналогий выйти за пределы электрофизики.

Известно, что внешний вид поверхности твердого тела после электроискровой обработки больше всего похож на рельеф Луны. (рис. 76)

Такое чрезвычайное сходство заставило обратиться к теориям возникновения лунных кратеров. Самым убедительным представляется образование их вследствие удара о поверхность Луны метеоритов, движущихся с большой скоростью. Примечательно, что к этому выводу также приводят экспериментальные данные, полученные в результате изучения действия высокоскоростных ударов, т. е. ударов о металлическую поверхность твердых тел, движущихся со скоростью, определяемой тысячами метров в секунду.

Такой удар сразу же сопровождается сильной световой вспышкой, а когда фронтальная часть тела углубляется в мишень, навстречу ему выбрасывается поток частиц мишени со скоростью, примерно в два раза превышающей начальную скорость тела. В этот момент начинается образование кратера. Материал мишени течет радиально от точки удара, создавая полукруглое углубление. Часть материала движется по краям кратера и выбрасывается струей. По мере увеличения кратера угол струи становится более крутым, скорости выброса уменьшаются. В результате вокруг кратера появляется обод из застывших частиц — весьма характерная форма, напоминающая по внешнему виду вазу для цветов.

В искровом электрическом разряде происходит быстрое освобождение в межэлектродном пространстве определенной порции энергии. Как уже указывалось, в этой форме электрического разряда основным носителем энергии является самофокусированный поток электронов.

Рассматривая электрон как частицу, имеющую массу и движущуюся по законам механики, можно провести аналогию между явлениями, сопровождающими высокоскоростной удар тела с большой массой, с ударом электрона о твердую металлическую поверхность. Можно применить к этому элементарному микропроцессу выводы, которые получены механиками и астрономами при объяснении лунных воронок, образованных метеоритами. Это предположение подтверждено соответствующими экспериментами.

На рис. 74 представлены кадры скоростной киносъемки воздействия искрового электрического импульса на поверхность жидкого анода. На кадрах видно, что после пробоя межэлектродного пространства в результате резкого торможения потока электронов на поверхности анода образуется лунка, с краев которой с большой скоростью сбрасывается материал анода. При этом, как и в ранее рассмотренном случае, образуется специфическая форма, похожая на вазу для цветов.

Также было установлено, что энергия, накопленная системой, мгновенно и фокусированно освобождается на аноде, т. е. движущийся

с большой скоростью электронный луч встречает на своем пути твердую металлическую поверхность. Дальнейший же процесс будет зависеть от толщины анода.

Если анодом является очень тонкий проводник тока, например металлическая фольга, то пучок электронов, ударившись о поверхность анода, пробивает ее и продолжает свой путь в заанодной области. Этой возможностью пучка электронов можно было воспользоваться, например, для воздействия на диэлектрические материалы, осуществляя на поверхности стекла надписи с помощью электроштихеля. Либо для определения диаметра пучка электронов, пролетающего через металлическую фольгу, сравнивая его с размером (профилем) образующейся, при прочих равных условиях, лунки.

Когда анодом является достаточно толстая пластина, пучок летящих электронов будет внезапно остановлен металлической поверхностью. При этом вся энергия торможения электронов выделяется в поверхностных слоях анода. Поскольку мощности при этом имеют чрезвычайно большие значения, происходит направленный взрыв на участке анода, воспринявшего импульс. В этот момент весь не только расплавленный, но и размягченный металл выбрасывается из чаши, образовавшейся в результате на аноде. Часть металла, выброшенного в межэлектродное пространство, достигает противоположного электрода и прочно соединяется с его поверхностью. Таковы процессы в межэлектродном промежутке и на электродах при прохождении искрового импульса в воздухе.

На рис. 75 показан вид кратера, образующегося на металлической поверхности после искрового разряда.

Результат выстрела в медную плиту стальным шаром $\varnothing 203$ мм со скоростью 5,6 мм/с описан в публикации А.С. Charters High-speed impact. Scientific American, 1960, No 4.

Вид образовавшегося кратера представлен на рис. 77. Для сопоставления внизу фото показан вид сверху на кратер — *a*, и разрез кратера — *б*. Специалистам, работающим в области электроискровых технологий, эти снимки напоминают лунки, образующиеся в результате действия искровых электрических импульсов.

Когда на пути шара, летящего с высокой скоростью, оказывается стальная пластина, толщина которой соизмерима с его диаметром, то в результате удара происходит отслаивание определенной части пластины. Это отчетливо демонстрирует фотография сечения этой пластины на рис. 78.

Динамическое действие искрового электрического разряда иллюстрируется рис. 79 и 80. В обоих случаях между анодами — пластинами — возбуждается искровой

разряд с катода — остря. В том случае, когда пластина была сравнительно толстой (рис. 79), имела место лишь деформация поверхности. Однако при уменьшении толщины пластины-анода поток частиц, идущий от катода, пробивает ее и продолжает полет в заданной области. Рис. 75, 78 и 79 подтверждают, что мгновенные давления, развиваемые частицами на поверхности анода, достигают громадных величин.

Электродинамическая теория выброса металла искровым электрическим разрядом не только легко объясняет имеющийся экспериментальный материал, но все время подтверждается во время новых испытаний.

Например, только динамическим действием пучка электронов могут быть объяснены наблюдающиеся при электроискровой обработке алюминия измельчение кристаллов в разных точках лунки и деформации сдвига — вверху слева на рис. 81.

Это послужило основанием для проведения исследования электрической эрозии электродов под действием искровых разрядов малой энергии микросекундной длительности и потребовало использования оригинального способа исследования — методики групповых лунок. Ее отличие от других методик в том, что она исключает влияние загрязнения межэлектродной среды, интенсивности эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, качества



Рис. 75. Внешний вид кратера, полученного на металлической поверхности в результате одного электрического разряда

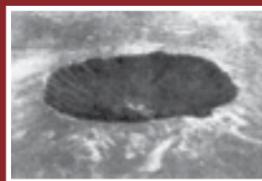


Рис. 76. Внешний вид кратера на Луне (кратер Аризона)

регулирования межэлектродного расстояния, износа электрода-инструмента и других факторов на величину эрозии электродов. Процесс может осуществляться в капле межэлектродной среды, нанесенной на полированную поверхность анода практически мгновенно — в течение нескольких секунд. Достоинством этой методики, помимо ее простоты и быстроты осуществления, является также возможность получения с помощью фотографий следов эрозии — лунок — в виде своеобразных эрозиограмм процесса, сведений обо всех геометрических размерах лунок, а также характере выброса из них материала. Так, вид валика по периферии лунки характеризует долю расплавленного материала, выжатого, но не выброшенного из лунки. Чем меньше его объем, тем эффективнее идет процесс и тем большая доля материала удаляется за счет его испарения.

Каждому материалу — свой режим обработки

Выполненные нами исследования показали, что внешние виды, форма и размеры лунок существенно зависят от материала. На рис. 82 приведены фотографии и сечения лунок на поверхностях различных материалов, образовавшихся в результате искровых разрядов между электродами. Межэлектродная среда — керосин. Энергия импульсов $W_0 = 250$ мкДж, напряжение на электродах $U_0 = 130$ В. На фото справа — вид с интерференционными кольцами в монохроматическом свете ($\lambda/2 = 0,293$ мкм). Исследования проводились по методике групповых лунок.

Установлено, что лунки на медных анодах имеют четкую форму, близкую к параболоиду вращения или шаровому сегменту (коэффициент формы $k_\phi \approx 0,4$).

При $W_0 = 250$ мкДж их диаметр $D = 28-32$ мкм, глубина $h = 3-3,5$ мкм, объем $V = (10-14,5) \cdot 10^{-7}$ мм³.

Они обрамлены довольно четким валиком шириной $b = 2-6$ мкм, высота которого (h_v) не превышает 0,6 мкм, а объем составляет 3 % от объема материала, выброшенного из лунки. Отношение диаметра к глубине $D/h = 8-10$.

Лунки на вольфраме, в отличие от лунок на меди, имеют более плоское дно и профиль полуэллипсоида вращения или кругового цилиндра ($k_\phi \approx 0,625$). Но у них глубина примерно в 2 раза меньше, а отношение $D/h \approx 20$. Они отличаются неравномерностью высоты и ширины валиков по периферии. Лунки на поверхности поликристаллического вольфрама имеют объемы в 1,5 раза меньше, чем на меди. Некоторым своеобразием отличаются контуры лунок, полученные на монокристаллическом вольфраме. Они представляют собой много-

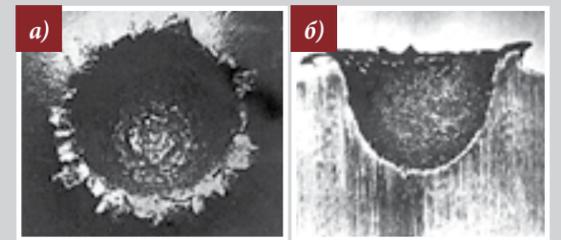


Рис. 77. Результат высокоскоростного удара медной плиты стальным шаром

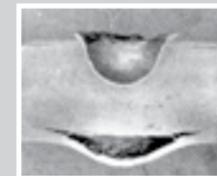


Рис. 78. Результат высокоскоростного удара шара о стальную пластину, толщина которой соизмерима с его диаметром



Рис. 79. Деформация алюминиевого анода толщиной 1 мм в результате одного искрового разряда:

$U = 700$ В; $C = 114$ мкФ. Межэлектродная среда — воздух

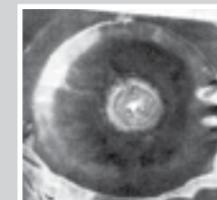


Рис. 80. Пробой медного анода толщиной 0,5 мм потоком частиц, летящих от катода (один импульс):

$U = 700$ В; $C = 114$ мкФ. Межэлектродная среда — воздух

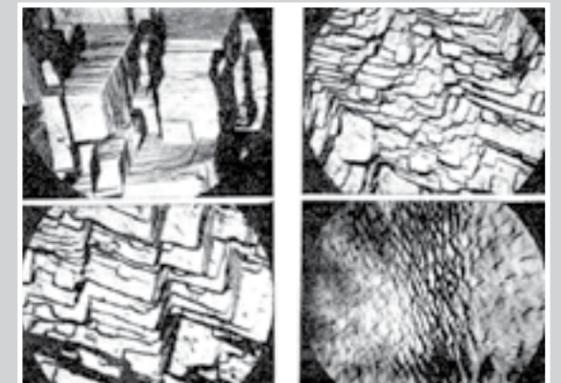


Рис. 81. Результат динамического действия пучка электронов при электроискровой обработке алюминия: деформации сдвига — вверху слева и измельчение кристаллов в разных точках лунки (от периферии к центру)

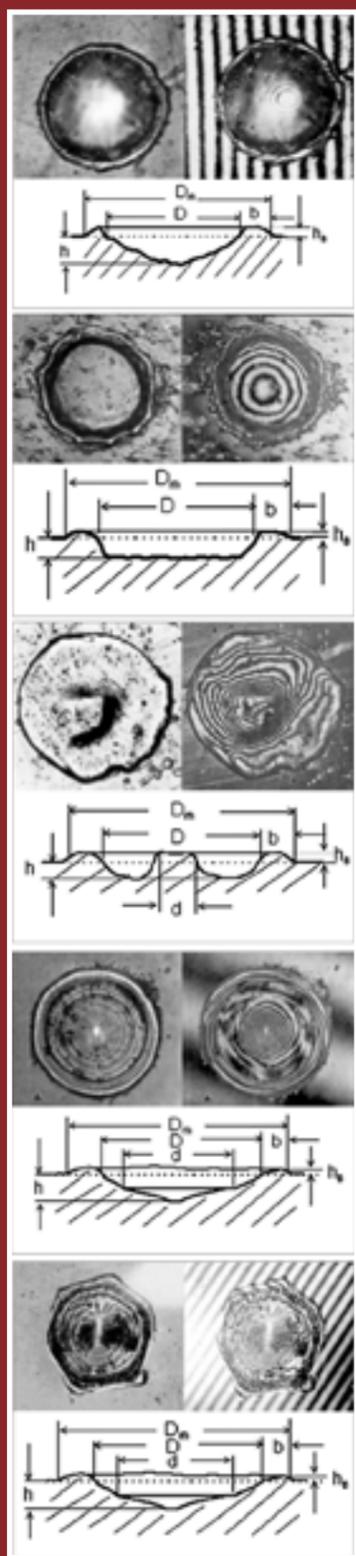


Рис. 82. Внешние виды лунок, образованных на различных материалах:
 а) медь МБ;
 б) вольфрам монокристаллический;
 в) сталь ХВГ;
 г) кремний (удельное сопротивление 0,05 Ом·см);
 д) германий (удельное сопротивление 0,05 Ом·см)

гранник. Анализ размеров их элементов, а также объемов показывает, что на поверхности монокристаллического вольфрама площадь лунок на 14 %, глубина на 17 %, а объем в 1,5 раза больше, чем на поликристаллическом вольфраме, и соизмеримы с объемами лунок на меди. Такую разницу в объемах можно объяснить удалением части материала в первой фазе процесса за счет микроскалывания, т. к. развитие хрупкого разрушения по плоскостям спайности в монокристаллах происходит значительно легче, чем в поликристаллах. Диаметры пораженных разрядом участков на поликристаллическом вольфраме и меди отличаются незначительно.

На поверхности стали характерно наличие выступов в центре лунок, которые имеют вид островков неправильной формы, что является следствием недостаточности теплового потока для данного случая.

Для твердых сплавов по сравнению с медью характерны лунки больших диаметров (в 1,2 раза), но меньших глубин (в 2 раза), с неровным дном, по форме близким к полуэллипсоиду вращения ($k_\phi \approx 0,5$). Валики по периферии лунок на твердых сплавах имеют еще более неравномерную высоту по сравнению с монокристаллом вольфрама. Объемы лунок на поверхности твердых сплавов в 1,25 раза меньше, чем на меди, и в 1,2 раза больше, чем на поликристаллическом вольфраме. Характерным отличием дна лунок на твердых сплавах является также наличие на их поверхности большого количества частиц размером около 1–2 мкм.

Изучение лунок, возникающих в результате искровых разрядов на поверхностях полупроводниковых материалов, показало, что они имеют характерные особенности по сравнению с лунками, образующимися (при прочих равных условиях) на металлах. Лунки на кремнии с удельным сопротивлением 0,05 Ом·см имеют почти идеальную форму конуса. Кроме формы, они отличаются от лунок на металлах наличием довольно широких валиков по периферии, образующихся в результате «выжимания» части расплавленного, но не выброшенного материала. Ширина этих валиков может достигать половины диаметра лунок.

Для лунок на кремнии характерно наличие конических выступов или углублений в их центре. Лунки на кремнии также отличаются от лунок на меди или вольфраме большим диаметром.

Лунки на германии с удельным сопротивлением 0,05 Ом·см можно разделить на три типа:

- ♦ лунки первого типа имеют круглую форму, конусообразный профиль и отличаются от лунок на кремнии в основном меньшим диаметром (примерно в 1,4 раза);
- ♦ лунки второго типа имеют внешние контуры почти правильной шестиугольной формы, но в остальном подобны лункам на кремнии;
- ♦ лунки третьего типа характеризуются наличием плоского дна, диаметр которого близок к диаметру лунок первого типа. Внешний контур лунок, как и во втором случае, почти правильный шестиугольник, но несколько больших размеров.

На некоторых фотографиях лунок на германии видны застывшие брызги расплавленного материала и отчетливо выделяются следы капель, которые отброшены от их периферии на расстояние порядка 50 мкм. Отдельные капли

материала упали на поверхность материала недалеко от края пораженного участка и застыли в виде шариков диаметром от десятых долей до 7–9 мкм.

Приведенные фотографии лунок на различных материалах, полученные при прочих равных условиях, убедительно подтверждают необходимость точного определения режимов обработки, соответствующих обрабатываемому материалу.

Методика определения эффективности электроискрового процесса по лункам, образующимся на поверхности обрабатываемого материала в результате возникновения искрового разряда между электродами, позволяет получать необходимую информацию для выбора оптимальных режимов обработки. С ее помощью можно прогнозировать величину микрозаусенцев, возникающих по кромкам, корректировать выбранный режим обработки, судить о том, в каком виде удаляется материал из зоны приложения разряда. По сопоставлению размера и вида лунок, образующихся на поверхностях анода и катода (обрабатываемой детали и электрода-инструмента), можно судить о распределении энергии между ними и возможной величине износа электрода-инструмента.

Коэффициент формы лунки k_ϕ является характеристикой эффективности воздействия искровых разрядов на твердое тело.

В зависимости от условий обработки (прежде всего, от параметров импульсов и материала анода) лунки могут иметь формы, близкие к одной из следующих:

- ♦ круговому цилиндру ($k_\phi \approx 0,7$);
- ♦ полуэллипсоиду вращения ($k_\phi \approx 0,5$);
- ♦ параболюиду вращения ($k_\phi \approx 0,4$);
- ♦ круговому конусу ($k_\phi \approx 0,3$).

Обычно для меди $k_\phi \approx 0,4$, для вольфрама $k_\phi \approx 0,5–0,65$.

По сути, коэффициент формы лунки k_ϕ является характеристикой эффективности воздействия искровых разрядов на твердое тело. Как будет показано ниже (в разделах о влиянии межэлектродного промежутка и времени запаздывания начала разряда на эффект эрозии), коэффициент формы лунки k_ϕ (а также диаметр D , глубина h и объем лунки V) существенно зависит от начального напряжения на электродах U_0 и межэлектродного расстояния L , а также запаздывания начала разряда с момента достижения заданной величины напряжения на электродах. При этом объем выбрасываемого за импульс материала, а следовательно, и интенсивность процесса, могут изменяться в несколько раз.

Объем лунки на аноде в зависимости от энергии импульса можно представить в виде

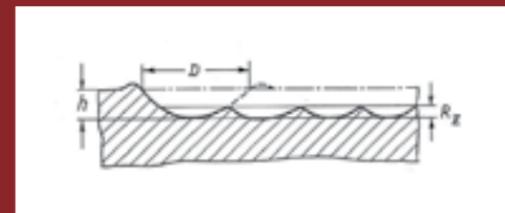


Рис. 83. Схема образования шероховатости поверхности в результате воздействия на нее серии искровых разрядов (D , h — диаметр и глубина лунки, $R_z = R_{\max}$)

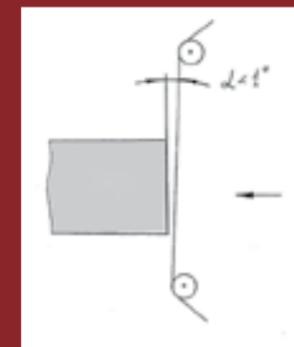


Рис. 84. Схема расположения электрода-проволоки для образования лунок

$$V = k_\phi \cdot k_D^2 \cdot k_h \cdot W_0 \cdot 10^{-9} = K_3 \cdot W_0, \text{ мм}^3, \quad (1)$$

где K_3 — удельная эрозия, зависящая главным образом от материала электродов, длительности разряда, величины межэлектродного расстояния, мм³/мкДж. Следовательно, удельная эрозия K_3 пропорциональна коэффициентам формы и глубины лунки (k_ϕ , k_h) и квадрату коэффициента диаметра лунки (k_D):

$$K_3 = k_\phi \cdot k_h \cdot k_D^2 \cdot 10^{-9}, \text{ мм}^3/\text{мкДж}. \quad (2)$$

Установлено также, что удельная эрозия может изменяться в пределах от $2 \cdot 10^{-9}$ до $10 \cdot 10^{-9}$ мм³/мкДж. Учитывая наиболее вероятные значения коэффициентов k_ϕ , k_D и k_h , наиболее вероятное среднее значение удельной эрозии $K_3 = 3,6 \cdot 10^{-9}$ мм³/мкДж.

Объем материала, выбрасываемого с поверхности электродов, между которыми возник искровой разряд, пропорционален энергии импульса. Отсюда, зная объем лунки V , образующейся на поверхности обрабатываемой детали (аноде), можно определить и энергию импульса W_0 , которая позволяет получить заданную шероховатость поверхности:

$$V = K_3 \cdot W_0, \text{ мм}^3; \quad (3)$$

$$W_0 = V/K_3, \text{ мкДж}, \quad (4)$$

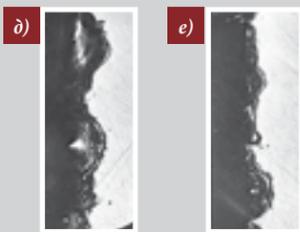
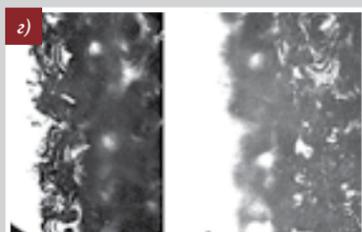
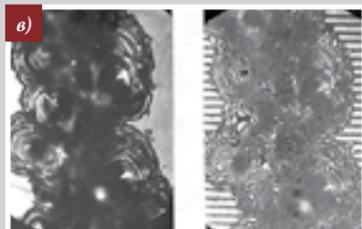
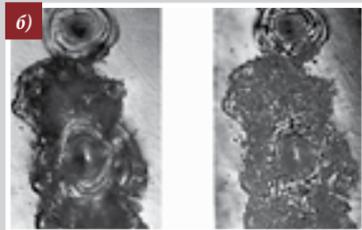
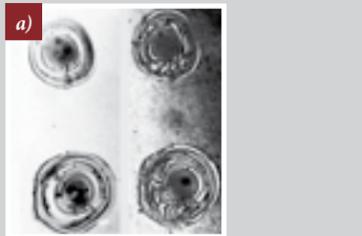


Рис. 85. Лунки на поверхности кремния и последовательность образования паза

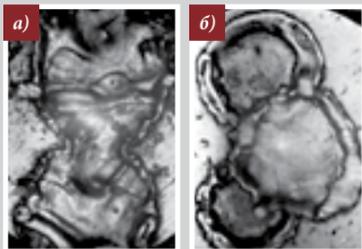


Рис. 86. Начальный момент формирования паза электродом-проволокой Ø 0,3 мм. Генератор тиратронный, $W_0 = 69\,000$ мкДж. Среда — вода

где K_0 — удельная эрозия, $\text{мм}^3/\text{мкДж}$, зависящая главным образом от материала электродов, длительности разряда, пробивного межэлектродного расстояния (зазора). В результате воздействия на обрабатываемую поверхность серии искровых разрядов образуется своеобразная («лунная») поверхность как следствие взаимного перекрытия лунок. При этом максимальная шероховатость поверхности $R_{\text{max}} \approx 1/3 h$ (рис. 83).

$$R_{\text{max}} \approx k_h/3 W_0^{1/3}, \text{ мкм.} \quad (5)$$

Для медных электродов при обработке в керосине (ориентировочно — также для большинства металлов) $k_h/3 \approx 0,15$, поэтому: $R_{\text{max}} \approx 0,15 W_0^{1/3}$, мкм. С другой стороны,

$$W_0 \approx 27 / k_h^3 R_{\text{max}}^3, \text{ мкДж или (для } k_h = 0,45) \\ W_0 \approx 296 R_{\text{max}}^3, \text{ мкДж.}$$

Таким образом, по размерам образующихся лунок (диаметру D , глубине h , объему V и профилю), а также валиков по их периферии, можно судить о том, насколько эффективно было воздействие теплового потока (потока электронов) в точках его приложения, как распределялась энергия разряда между электродами. Можно также прогнозировать не только шероховатость обработанной поверхности, но и размеры микрозаусенцев по кромкам формообразуемых поверхностей, так как следы эрозии на поверхностях электродов (аноде и катоде) представляют собой эрозиограммы процесса воздействия на твердое тело искровых разрядов.

Особенности электроискрового формообразования электродом-проволокой

При изучении форм и размеров лунок, образованных разрядами при электроискровой обработке электродом-проволокой, применялась следующая методика. При определенной энергии импульсов осуществлялось врезание в исследуемый образец. Причем проволока устанавливалась под небольшим углом относительно его поверхности (рис. 84). На рис. 85 показан процесс образования паза на полированной поверхности кремниевой пластины электродом-проволокой Ø 0,04 мм при $W_0 = 250$ мкДж. Здесь можно проследить последовательность образования паза. Сначала появляются отдельно расположенные лунки (а), затем последовательно группы лунок (б), начало прорезаемого паза (в, г) и, наконец, его кромки (д, е). На рис. 78, г слева изображение сфокусировано на поверхности образца, а справа — на дне образующегося паза. При этом размер валиков вокруг лунок определяет и величину микрозаусенцев, образующихся по кромкам: чем больше первые, тем значительнее и вторые, и тем большая часть расплавленного металла не удаляется из лунки, а располагается вокруг ее периметра в виде валика.

На рис. 86 изображен начальный момент формообразования электродом-проволокой Ø 0,3 мм торцевой поверхности паза по известной схеме многократного перекрытия лунок. Генератор импульсов — тиратронный, $W_0 = 69\,000$ мкДж, межэлектродная среда — вода питьевая. На фото зафиксирован процесс последовательного перекрытия лунок.

Известно, что диаметр эрозионных лунок изменяется в более широких пределах, чем их глубина. Поэтому в случае, когда

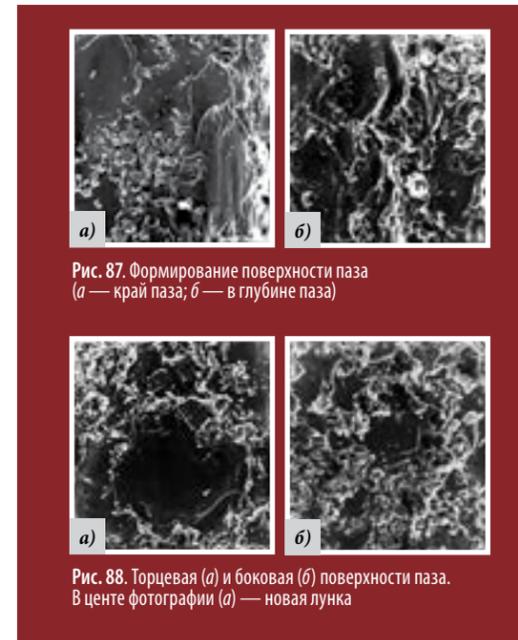


Рис. 87. Формирование поверхности паза (а — край паза; б — в глубине паза)

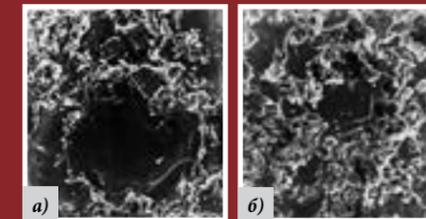


Рис. 88. Торцевая (а) и боковая (б) поверхности паза. В центре фотографии (а) — новая лунка

по диаметру лунки соизмеримы с электродом, образуются и более широкие пазы.

На рис. 87 представлены участки пазов при увеличении $\times 800$: правый край паза (а) и его вид при некотором приближении к торцу (б). На рис. 88 — торцевая (а) и боковая (б) поверхности паза. В центре фотографии (а) — новая лунка.

В электронной промышленности при изготовлении важнейших деталей приборов, таких как сетки клистронов, анодные блоки магнетронов и амплитронов, замедляющие системы ламп обратной волны, катоды и др., применяется электроискровое формообразование электродом-проволокой из меди МБ (Ø 0,08–0,2 мм), вольфрама ВА-3 (Ø 0,05–0,06 мм) и молибдена МЧ (Ø 0,015–0,06 мм).

Физико-механические свойства материала и диаметр электрода-проволоки оказывают существенное влияние на основные технологические характеристики электроискрового формообразования. В частности, этот материал должен обладать высокой механической прочностью, эрозионной устойчивостью, хорошей электро- и теплопроводностью. При низкой эрозионной стойкости межэлектродное пространство интенсивно заполняется продуктами эрозии не только анода, но и катода (электрода-проволоки). Это приводит к значительному ухудшению условий эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, а следовательно, и к снижению интенсивности процесса, а в дальнейшем также и к обрыву проволоки.

Вольфрам, обладающий высокой механической прочностью (в 7 раз больше, чем меди, и в 2 раза — молибдена), является наилучшим

материалом для электрода-проволоки. Однако и у него есть недостатки: хотя он и обладает высокой прочностью кристаллической решетки (временное сопротивление разрыву у него почти в 3 раза больше, чем молибдена), сохраняющейся до температуры 700–800 °С, вольфрамовая проволока под действием высоких температур (более 2000 °С) рекристаллизуется и становится ломкой.

Макрогеометрия поверхности паза, формообразуемого электродом-проволокой

Макрогеометрия поверхности паза, формообразуемого электродом-проволокой, характеризуется наличием макронеровностей, основные виды которых представлены на рис. 89, а–в. Наличие волнистости (а) определяется действием таких факторов, как недостаточная точность изготовления механических узлов станка, низкое качество направляющих электрода-проволоки, его колебания и других. Отдельные макронеровности (б) и зарезы (в) характерны при обработке микродеталей в ручном режиме или при неравномерности подачи, задержке их переключения и других случайных факторах.

Эксперименты по прорезанию пазов электродом-проволокой Ø 50–60 мкм показали, что образование макронеровностей может вызываться низким качеством проволоки, наличием на ее поверхности неровностей и заусенцев. На рис. 90 приведены фотографии отдельных участков молибденовой проволоки Ø 60 мкм и соответствующие пазы, прорезанные ею. При использовании проволоки с заусенцами и отдельными утолщениями, или «наростами» (а), на ее поверхности величиной 10–25 мкм образуется поверхность с соответствующими неровностями, превышающими или соизмеримыми с величиной межэлектродного зазора. Это оказывает существенное влияние на процесс формообразования поверхности паза при электроискровом вырезании тонкой проволокой и отражается на рельефе боковой поверхности паза (показанной на фото справа от проволоки). Отсутствие каких-либо загрязнений проволоки (в) гарантирует высокое качество пазов.

Формирование электродом-проволокой паза с определенной шероховатостью поверхности

Схема образования паза представлена на рис. 91:

$$B = d + l_{\text{пр}} + h_n = d + \Delta,$$

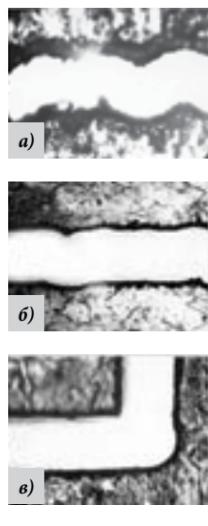


Рис. 89. Основные виды макронеровностей поверхности паза. Медь МБ толщиной 0,3 мм. Электрод-проволока МЧ Ø 0,05 мм, 300: а — волнистость; б — отдельные макронеровности; в — разрезы

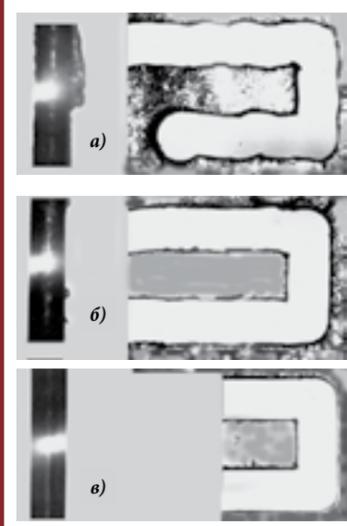


Рис. 90. Влияние качества электрода-проволоки на макрогеометрию паза; а-в — отдельные участки электрода-проволоки и соответствующие им участки пазов. Электрод-проволока МЧ Ø 0,06 мм

где B — ширина паза; d — диаметр электрода-проволоки; $l_{пр}$ — пробивной промежутка; h_n — глубина лунки; Δ — межэлектродный зазор.

Шероховатость поверхности после электроискровой обработки связана с параметрами лунок, возникающих под действием искровых разрядов. К таким параметрам относятся диаметр D , глубина лунки h_n , высота валика по периферии лунки и соотношение D/h_n .

Максимальную величину шероховатости можно оценить по формулам:

$$1/3 h_n \leq R_z \leq h_n \text{ при } 1 \leq \beta \leq 2; \\ R_z = \beta^2/3 \cdot [h_n \cdot R_n \cdot 2/(R_n^2 + h_n)],$$

где β — коэффициент перекрытия лунок. Наиболее вероятное значение $\beta = 1,1$.

Оценка шероховатости поверхности при электроискровом вырезании проволокой Ø 0,3 мм и Ø 0,05 мм проводилась на установке с тиратронным генератором при энергиях импульсов W_0 , отличающихся на три порядка — 65 мкДж и 65000 мкДж. В зависимости от режима обработки средний диаметр лунок может быть либо значительно меньшим, либо соизмеримым с диаметром электрода-проволоки. В том случае, когда эрозионный след по диаметру значительно меньше электрода-проволоки,

формирование поверхности осуществляется по обычной схеме путем многократного взаимного перекрытия лунок. При этом величина шероховатости поверхности R_z не превышает глубины лунки h_n .

При изучении рельефа поверхности паза применялась следующая методика. Медным электродом-проволокой Ø 0,3 мм прорезались паза в трех пластинах, толщиной $h_1 = 5$ мм, $h_2 = 0,07$ мм и $h_3 = 20$ мм, сложенных без зазора. Толщина первой и третьей пластины выбиралась произвольно, а средней — определялась из условия $h_2 < D$. При этом можно наблюдать сечение паза, прорезанного одновременно в трех из них.

Если диаметр лунки соизмерим с диаметром электрода-проволоки, то формирование рельефа поверхности отличается от обычной схемы. На рис. 92 приводится сечение паза, прорезанного в медных пластинах электродом-проволокой Ø 0,3 мм.

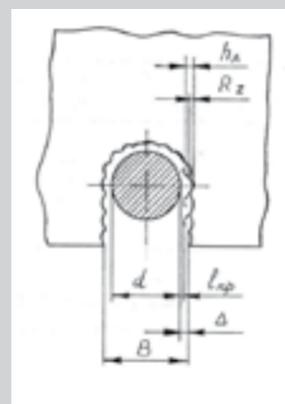


Рис. 91. Схема образования паза: B — ширина паза; d — диаметр электрода-проволоки; $l_{пр}$ — пробивной промежутка; Δ — межэлектродный зазор; h_n — глубина лунки; R_z — шероховатость боковой поверхности паза



Рис. 92. Сечение паза, прорезанного в медной пластине медной проволокой Ø 0,3 мм. $W_0 = 65000$ мкДж. Среда — вода

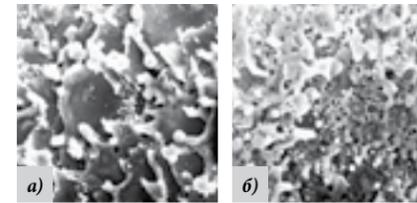


Рис. 93. Фотографии поверхности меди после электроискровой обработки:

$t = 0,6$ мкс, $C_{ш} = 0$, $q = 7 \cdot 10^8$ Вт/см² (а)
 $t = 0,2$ мкс, $C_{ш} = C_{ш\max}$, $q = 1,7 \cdot 10^7$ Вт/см² (б): 3000

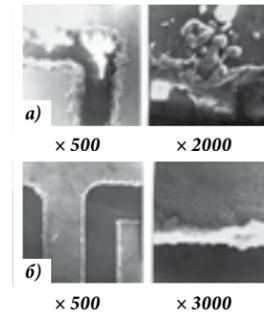


Рис. 94. Формирование микрозаусенцев на краях паза. Электрод-проволока МЧ Ø 0,05 мм. Генератор тиратронный, $C_{ш} = 500$ пФ, $f = 88$ кГц, $U_a = 800$ В
а) $C_{ш} = 0$; б) $C_{ш} = 2500$ пФ

На изображении видно различие в формировании шероховатости поверхности торцевой и боковой частей паза. Торцевая поверхность формируется по известной схеме в результате многократного взаимного перекрытия лунок, а боковая формируется в основном периферией лунок за счет разброса диаметра лунок, который изменяется в значительно более широких пределах, чем их глубина. При этом ширина паза равна примерно двум диаметрам лунки. Следует отметить, что микронеровности торцевой поверхности значительно меньше боковой. Различия в механизмах формирования рельефа этих поверхностей паза, а также возникновение отдельных лунок уже на обработанной поверхности вследствие возникновения боковых разрядов приводят к увеличению ширины паза.

При повышенных требованиях к качеству поверхности режим обработки должен выбираться таким образом, чтобы диаметр образующихся лунок был значительно меньше диаметра проволоки. Применение же малых энергий импульсов микросекундной длительности, обеспечивающих высокое качество обработки, при использовании проволок Ø 0,2–0,3 мм будет связано с неоправданно низкой скоростью формообразования. Это определяется большой шириной паза и необходимостью удаления из зоны обработки излишних объемов металла в связи с тем, что ширина паза B зависит от диаметра проволоки d и межэлектродного зазора Δ . Уменьшение длительности импульсов при одновременном увеличении их амплитуды и плотности теплового потока приводит к значительному увеличению доли материала, удаляемой в мелкодисперсной фазе, и более интенсивному его выбросу с обрабатываемой поверхности.

На рис. 93, а, б представлены фотографии, сделанные с помощью электронного микроскопа на образцах меди, обработанных электроискровым способом на двух режимах. Показанная на рис. 93, а поверхность обрабо-

тана более длинными искровыми разрядами ($t = 0,6$ мкс, $C_{ш} = 0$), поэтому металл удалялся преимущественно в расплавленном состоянии. Вследствие недостаточной эффективности процесса значительная доля расплава оказалась не выброшенной с поверхности.

С уменьшением длительности импульсов и увеличением при этом плотности теплового потока становится более значительной доля испаренного металла и, кроме того, более интенсивное удаление его в расплавленном виде. Такое различие в формировании шероховатости поверхности сказывается и на процессе образования микрозаусенцев на краях паза.

На рис. 94 приводятся фото участков пазов и их кромок. Из них видно, что повышение эффективности процесса (уменьшение длительности импульса и увеличение при этом плотности теплового потока) значительно снижает величину микрозаусенцев.

Полученные сведения о влиянии изменения рельефа поверхности лунок на технологические показатели процесса сделали возможным управление качеством поверхности детали, а также повысили эффективность использования энергии искровых разрядов.

Анализ влияния параметров разрядной цепи генератора с импульсным трансформатором на формирование пазов

Анализ влияния параметров разрядной цепи на формирование пазов проводился на тиратронном генераторе импульсов (ГИ) с импульсным трансформатором (ИТ), в разрядную цепь которого включалось дополнительно безындукционное сопротивление (R_d) и шунтирующая емкость $C_{ш}$ (рис. 95). При их подключении особую роль играет передний фронт импульса напряжения. Кроме того,

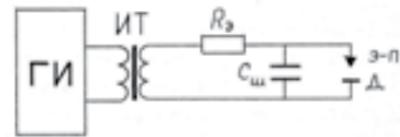


Рис. 95. Принципиальная электрическая схема источника питания, используемого при изучении процесса прорезания пазов:
Э-П — электрод-проволока;
Д — обрабатываемая деталь

большое значение имеет энергия, запасенная в $C_{ш}$ к моменту пробоя.

Применяемая при прорезании узких пазов вольфрамовая или молибденовая проволока диаметром несколько сотых долей миллиметра имеет, как известно, значительное электрическое сопротивление, составляющее несколько единиц или десятков Ом. Поэтому последовательно с электродами в зарядную цепь шунтирующего конденсатора включалось безындукционное сопротивление, величина которого выбиралась несколько больше величины электрического сопротивления разрядного контура.

Рассмотрим влияние включения в разрядную цепь тиратронного генератора с импульсным трансформатором безындукционного сопротивления и емкости на формирование переднего фронта импульсов напряжения, а также на показатели качества поверхности.

Влияние R_d и $C_{ш}$ на изменение длительности переднего фронта импульсов показано на рис. 96 и 97. Видно, что в зависимости от величины R_d меняется крутизна и длительность переднего фронта импульсов напряжения (рис. 98).

Включение сопротивления в разрядную цепь до некоторой степени уменьшает влияние индуктивности рассеяния импульсного трансформатора при формировании переднего фронта импульсов напряжения, что повышает долю энергии, запасенной в конденсаторе $C_{ш}$. При пробое ток в межэлектродном промежутке определяется суперпозицией двух составляющих токов, протекающих через $C_{ш}$ и $C_{ш}$. При определенном значении $C_{ш}$ наблюдается форсирование импульса тока. Установлено, что чем

круче фронт импульса напряжения, тем при большем его значении происходит пробой промежутка.

Наилучшие условия для формирования импульсов напряжения для рассматриваемого случая достигаются при добавочном сопротивлении R_d порядка 4–7 Ом и емкости $C_{ш} \approx 2000\text{--}3000$ пФ.

На рис. 99 представлены экспериментальные зависимости величины микрозаусенцев от емкости шунтирующего конденсатора при прорезании пазов в медных пластинах толщиной 0,28 мм (а) и 2 мм (б). Зависимость имеет ярко выраженный минимум при 2500–3000 пФ. Кроме того, при изменении шунтирующей электроды емкости (рис. 100) изменяется рассеяние средней величины микрозаусенцев, достигая минимума при оптимальном значении $C_{ш}$. Аналогичные зависимости наблюдаются и при обработке других материалов, например вольфрама (рис. 101). Микрозаусенцы на нем меньше, чем на меди, что объясняется различием их теплофизических свойств, процесса формирования лунок и рельефа поверхности (рис. 102).

Следует отметить, что без включения в разрядную цепь дополнительного сопротивления не наблюдается изменения величины микрозаусенцев в зависимости от величины емкости $C_{ш}$, подсоединенной параллельно электродам, т.к. в этом случае подключение конденсатора не оказывает существенного влияния на формирование импульса рабочего тока.

На рис. 103 представлены фотографии лунок и пазов для случая обработки при $C_{ш} = 0$ (а) и $C_{ш} = 2500$ пФ (б), а на рис. 104 — осциллограммы рабочего тока при $C_{ш} = 0$ (а) и $C_{ш} = 2500$ пФ (б). Электрод-инструмент — молибденовая проволока МЧ $\varnothing 0,05$ мм.

Параметры лунок, импульсы тока и величина микрозаусенцев для случая прорезания пазов в меди при $C_{ш} = 0$ и $C_{ш} = 2500$ пФ, представлены в табл. 3.

Из нее следует, что диаметры лунок при отсутствии конденсатора, шунтирующего электроды, т.е. $C_{ш} = 0$ и ввода $C_{ш} = 2500$ пФ отличаются незначительно, объемы лунок — в 2 раза, а микрозаусенцы — более чем в 3 раза.

Таблица 3. Параметры эрозионных лунок, полученных на электроискровой установке с тиратронным генератором импульсов

Материал детали	D, мкм	h, мкм	D/h	V·10 ⁶ , мм ³	K _ф	K _э ·10 ⁹ , мм ³ /мкДж
Медь	190	11	17	160	0,4	2,5
X18H10T	170	4	42	67,5	0,6	1
ВК-8	150	3	50	13		0,2
Вольфрам монокристаллический	180	3	60	58	0,6	0,8

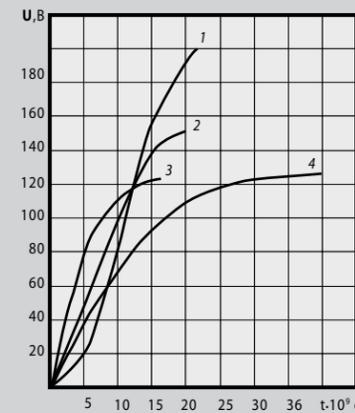


Рис. 96. Изменение переднего фронта импульса напряжения в зависимости от величины R_d ($U_a = 1000$ В, $C_{ш} = 500$ пФ, $L_s = 10\text{--}5$ Гн, $n = 20$; $C_{ш} = 2000$ пФ):
1 — $R_d = 0$; 2 — $R_d = 2$ Ом; 3 — $R_d = 5$ Ом;
4 — $R_d = 10$ Ом

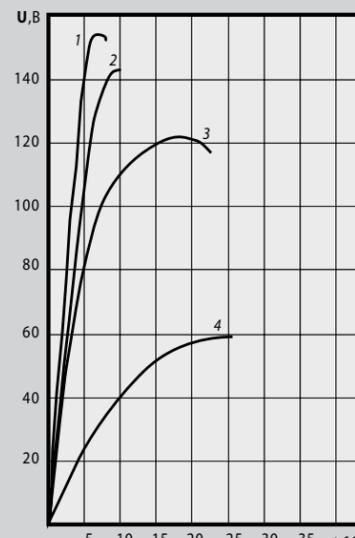


Рис. 97. Изменение переднего фронта импульса напряжения в зависимости от $C_{ш}$ ($R_d = 5$ Ом; $U_a = 1000$ В; $n = 20$):
1 — $C_{ш} = 200$ пФ; 2 — $C_{ш} = 500$ пФ;
3 — $C_{ш} = 2000$ пФ; 4 — $C_{ш} = 20000$ пФ

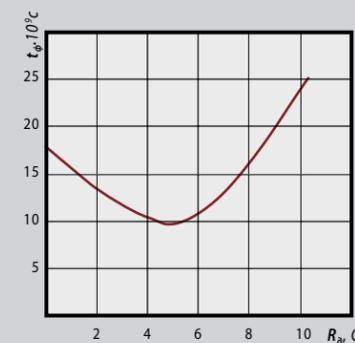


Рис. 98. Зависимость длительности переднего фронта импульса напряжения t_p от величины R_d

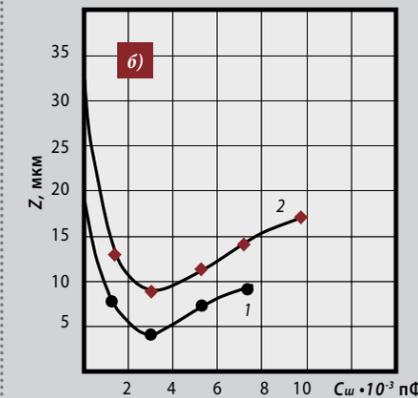
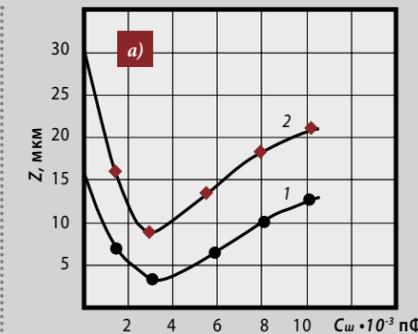


Рис. 99. Зависимость микрозаусенцев Z от $C_{ш}$ (материал детали — медь МБ, электрод-инструмент — молибденовая проволока $\varnothing 0,05$ мм):
1 — $Z_{мин}$; 2 — $Z_{макс}$. Толщина детали 0,28 мм (а) и 2 мм (б). $C_{ш} = 500$ пФ, $U_a = 800$ В, $n = 20$, $f = 88$ кГц.

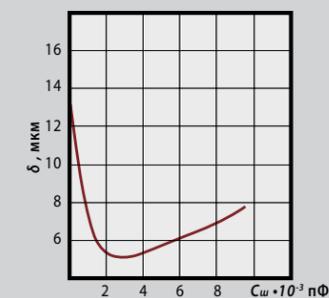


Рис. 100. Зависимость рассеяния δ величин микрозаусенцев от $C_{ш}$

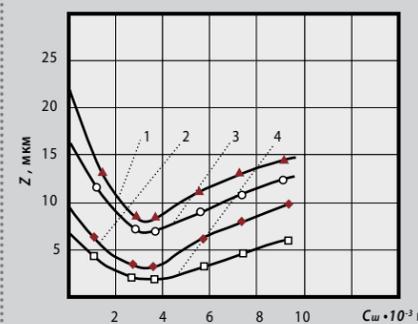


Рис. 101. Зависимость микрозаусенцев Z от $C_{ш}$ для различных материалов детали: $Z_{макс}$ и $Z_{мин}$ для меди (1, 2), для вольфрама (3, 4)

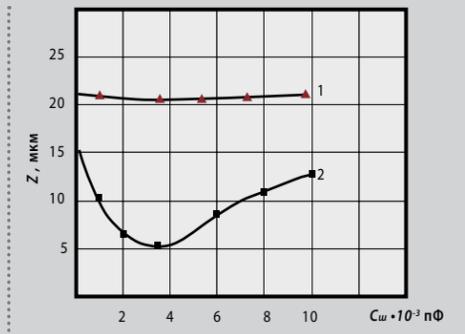


Рис. 102. Влияние R_d на формирование микрозаусенцев Z: $R_d = 0$ (1), $R_d = 5$ Ом (2)

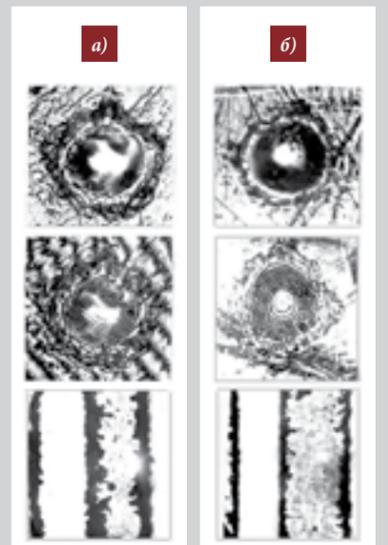


Рис. 103. Следы эрозии, полученные на меди, и соответствующие им участки пазов при $C_{ш} = 0$ (а) и $C_{ш} = 2500$ пФ (б)

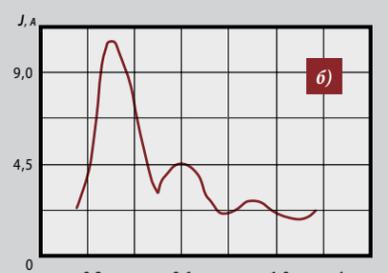
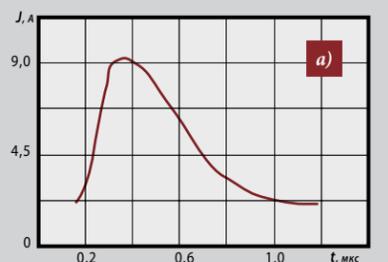


Рис. 104. Осциллограммы рабочего тока при $C_{ш} = 0$ (а) и $C_{ш} = 2500$ пФ (б)

Влияние межэлектродного зазора на эффективность процесса

Как известно, существенное влияние на объем вещества, выбрасываемого из электродов в точках прохождения разряда, наряду с величиной энергии и напряжения в начале разряда оказывает расстояние между ними (межэлектродный зазор).

На рис. 105 изображены пораженные участки (лунки) на медном аноде и катоде при зазорах L от 3 до 30 мкм и энергии импульса $W_0 = 150$ мкДж.

Анализируя представленные изображения, можно сделать следующие выводы:

- ♦ с уменьшением межэлектродного зазора диаметр лунок на аноде возрастает, достигая максимума при 9 мкм (оптимальная величина зазора);

- ♦ с уменьшением зазора размер лунок на катоде также увеличивается, при этом они теряют овальную форму, а валики вокруг них формируются в виде выплесков;

- ♦ при зазорах в несколько микрометров процесс формообразования лунок на электродах резко изменяется, их размеры на аноде и катоде возрастают, а по внешнему виду их невозможно различить. Они приобретают вид, получающийся при воздействии серии разрядов. Однако количество выбрасываемого материала не увеличивается. Это связано с тем, что с уменьшением зазора процесс приближается к границе инверсии разряда из искровой формы в дуговую.

В связи с этим **изготовление деталей целесообразно вести на зазорах, несколько превышающих оптимальные, т. е. равных 10–15 мкм, и не допускать их уменьшения до критического значения, равного 3–5 мкм.**

Зависимость удельной эрозии K_3 на аноде при энергиях импульсов $W_0 = 150$ мкДж и 500 мкДж от расстояния между электродами L_0 представлена на рис. 106. Оптимальная величина L_0 , обеспечивающая максимальный эффект эрозии при одинаковом напряжении, зависит от энергии импульса. С уменьшением этой энергии максимум эрозии на аноде смещается в сторону малых зазоров. Так, для энергии импульса 150 мкДж оптимальный зазор между

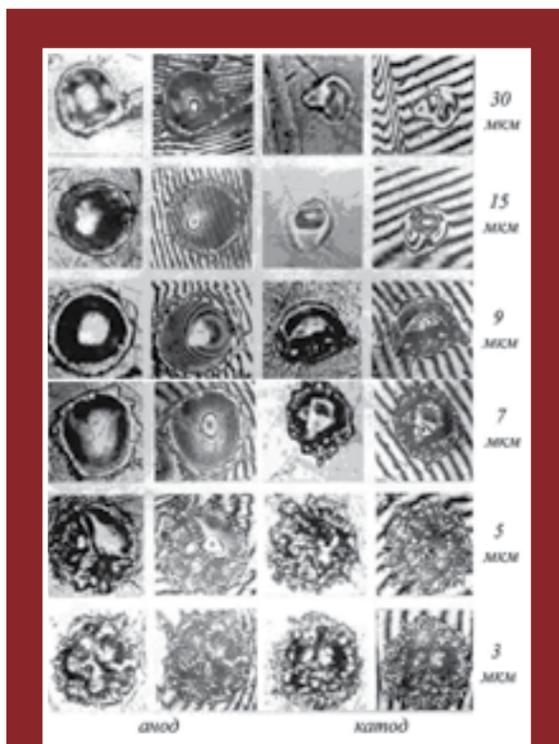


Рис. 105. Фотографии лунок на аноде и катоде при расстоянии между электродами 30; 15; 9; 7; 5 и 3 мкм, $W_0 = 150$ мкДж

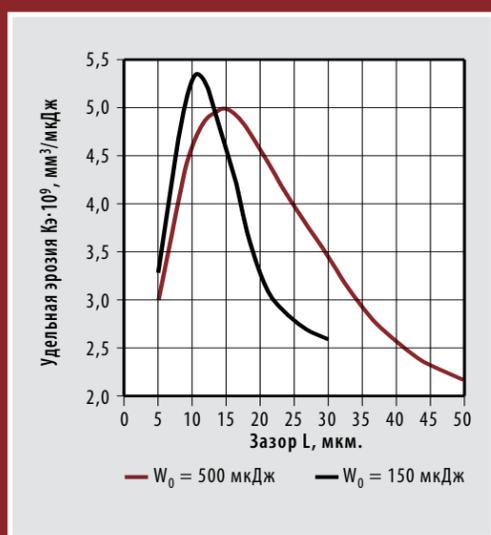


Рис. 106. Влияние зазора L (расстояние между электродами) на удельную эрозию K_3 для $W_0 = 500$ мкДж и $W_0 = 150$ мкДж

Таблица 4. Параметры лунок, импульсов тока и величина микрозаусенцев для случая прорезания пазов в меди. $C_{ш} = 0$ (а) и $C_{ш} = 2500$ пФ

$C_{ш}$, пФ	D , мкм	h , мкм	Ширина валика, b , мкм	D/h	Объем лунки, $V \cdot 10^6$, мм ³	$K_3 \cdot 10^9$, мм ³ /мкДж	Заусенцы		Амплитуда тока J_a , А	Длительность импульса t , мкс	J_a/t
							Z_{min} , мкм	Z_{max} , мкм			
0	19	2	8	9,5	0,19	3	18	40	9,3	0,6	23,3
2500	18	3	3	6	0,39	9	5	12	11,4	0,2	57

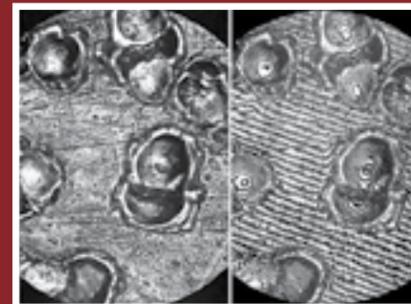


Рис. 107. Лунки на медном аноде, $U_0 = 80$ В, $W_0 = 64$ мкДж и вид в монохроматическом интерференционном свете ($\lambda/2 = 0,293$ мкм)

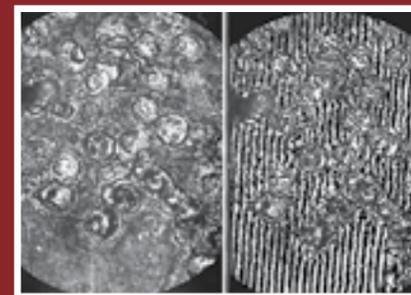


Рис. 108. Лунки на медном катоде, $U_0 = 80$ В, $W_0 = 64$ мкДж и вид в монохроматическом интерференционном свете ($\lambda/2 = 0,293$ мкм)

На рис. 107 и 108 представлены фотографии группы лунок на медном аноде и катоде, образовавшихся в результате искровых разрядов при $W_0 = 64$ мкДж, $U_0 = 80$ В.

Слева — общий вид лунок, справа — вид в монохроматическом интерференционном свете ($\lambda/2 = 0,293$ мкм).

На рис. 109 отображено влияние межэлектродного зазора L_0 на составляющие энергии импульса W_0 , равной 500 мкДж:

- ♦ энергию разряда W_p ;
- ♦ потери энергии W_n ;
- ♦ затраты на образование канала разряда W_k ;
- ♦ затраты на затухание разряда W_3 .

При этом оптимальный межэлектродный зазор, равный 10 мкм, обеспечивает максимальную эффективность процесса. С приближением межэлектродного зазора к оптимальной величине потери энергии W_n в канале разряда уменьшаются почти втрое, а энергия разряда W_p , выделяющаяся на электродах, увеличивается более чем в 2 раза. На энергию разряда (выброс материала с электродов) приходится 67 %, на потери энергии и затраты на образование канала разряда — по 15,5 %, а на затухание разряда — всего 4,2 %.

Рис. 110 иллюстрирует зависимость удельной эрозии K_3 , объемов лунок и их отношения V_a/V_k при $W_0 = 500$ мкДж, также видно, что оптимальный межэлектродный зазор равен 15 мкм. При этом объем лунки на аноде ра-

электродами равен примерно 10 мкм, а для энергии 500 мкДж — 15 мкм.

Для определения влияния межэлектродного промежутка на эффект эрозии (на аноде и катоде) с осциллографированием соответствующих импульсов напряжения и тока, выяснения характера распределения энергии, затраченной на образование искрового канала и непосредственно на выброс материала с электродов, использовалась методика одиночных импульсов. Для этого применялось устройство для возбуждения одиночных разрядов, обеспечивающее генерирование импульсов напряжения с достаточно крутым передним фронтом ($\approx 0,15$ мкс), амплитудой 50–150 В и длительностью 0,5–1,5 мкс.

При размере лунок, превышающих 80 мкм (т. е. когда их размеры при изучении на интерференционном микроскопе МИИ-4 выходили за пределы кадра), изучение профиля следов эрозии проводилось щуповым методом с помощью профилографа-профилометра модели 201. Геометрические размеры и объемы лунок определялись по профилограммам. Такая же методика применялась и при изучении лунок с большой крутизной стенок, с нерегулярной поверхностью, наличием впадин или выступов и других отклонений от правильной формы (табл. 4).

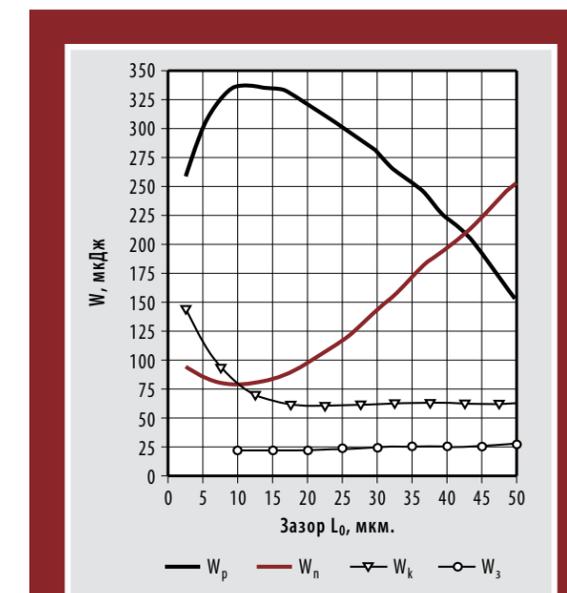


Рис. 109. Влияние межэлектродного расстояния на составляющие энергии импульса: W_p — энергия разряда; W_n — потери энергии; W_k — затраты на образование искрового канала; W_3 — затраты на затухание разряда

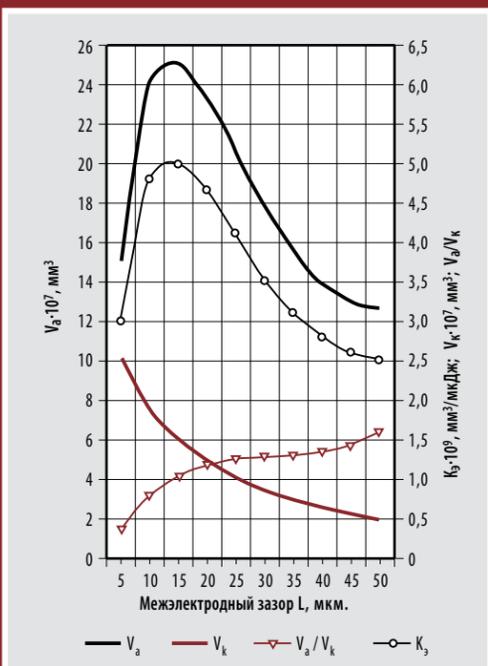


Рис. 110. Влияние межэлектродного расстояния на удельную эрозию K_3 , объемы лунок V_3 и V_k и их отношения V_3/V_k при $W_p = 500$ мкДж, $U = 60$ В

вен $25 \cdot 10^{-7}$ мм³, лунки на катоде — $6 \cdot 10^{-7}$ мм³ (т. е. в 4 раза меньше), а удельная эрозия — $5 \cdot 10^{-9}$ мм³/мкДж.

Таким образом, в реальных условиях электроискровой обработки влияние межэлектродного расстояния L_0 (напряжения на электродах) на глубину лунки h , отношение D/h и удельную эрозию K_3 столь существенно, что при в 3 раза меньшем значении энергии импульса электрическая эрозия может быть практически одинаковой.

Представленные графики еще раз подтверждают вывод о необходимости вести электроискровую обработку строго на оптимальных межэлектродных зазорах. Осуществление электроискрового процесса на слишком малых межэлектродных расстояниях (3–5 мкм при энергии импульса более 100 мкДж) сопровождается повышенным износом электрода-инструмента (катода) и существенным уменьшением эффективности процесса на обрабатываемой детали (аноде).

Увеличенные межэлектродные промежутки желательны не только из-за существенного уменьшения эффекта эрозии на катоде (т. е. уменьшения износа электрода-инструмента), но и в связи с возникающими при этом более благоприятными условиями эвакуации продуктов эрозии из зоны обработ-

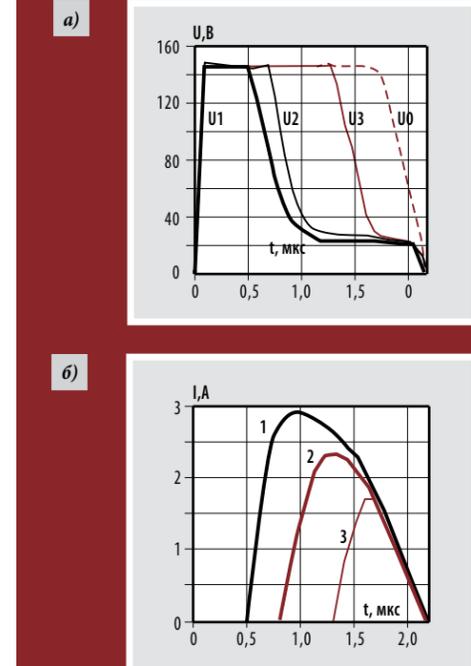


Рис. 111. Эпюры импульсов напряжений U на электродах (а) и импульсов токов I (б) при различных запаздываниях разрядов относительно момента появления напряжения на электродах

ки, обеспечивающими увеличение интегрального эффекта эрозии, т. е. производительности процесса.

Убедительные доказательства необходимости осуществления электроискрового процесса на оптимальных межэлектродных промежутках были практически получены на электроискровых станках фирмы Sodick с линейными приводами, которые намного производительнее обычных электроискровых станков. **Главное преимущество — в их фантастической точности. Дискретность подач линейных приводов для электроискровых станков может быть от 10 нм (0,01 мкм) до 0,1 мкм. При этом достигаемая точность формообразования — от десятых долей микрометра до 2–3 мкм на длине 300 мм, а наилучшая шероховатость — 0,03 мкм Ra (0,23 мкм R_{max}).** Обычные же приводы не обеспечивают требуемой точности подач из-за инерционности и наличия люфтов, больших потерь в механизмах преобразования вращательного движения в поступательное. В результате этого электроискровой станок с обычными приводами только незначительную часть времени работает с оптимальными искровыми зазорами и, соответственно, в оптимальных энергетических режимах.

Кстати, возможность многократного повышения скорости электроискрового формообразования за счет поддержания оптимального межэлектродного зазора была доказана отечественными учеными еще более 35 лет назад — в конце 1960-х гг.

О недопустимости запаздывания искрового разряда

Наряду с оптимальными зазорами на эффективность процесса влияют и задержки искровых разрядов относительно момента появления напряжения на электродах. На рис. 111 представлены эпюры импульсов напряжений U на электродах (а) и импульсов токов I (б) при различных запаздываниях разрядов: 0,5 мкс (U_1, I_1), 0,7 мкс (U_2, I_2) и 1,25 мкс (U_3, I_3) видно, что величина тока разряда уменьшается с увеличением запаздывания.

Запаздывание начала разряда определяет длительность и амплитуду импульса тока. От величины запаздывания зависит и энергия разряда (т. е. та часть энергии, которая тратится на сьем материала с электродов), а следовательно — и на производительность процесса.

Из представленных эпюр видно, что амплитуды импульсов токов, протекающих через межэлектродный зазор, зависят от времени запаздывания t_3 — времени, которое проходит с момента подачи напряжения на электроды до пробоя. Причем с увеличением t_3 амплитуда и длительность рабочего импульса тока уменьшаются.

Установлено, что с уменьшением запаздывания начала разряда с 1–1,5 мкс до 0,25 мкс энергия импульса W_p (рис. 112) увеличивается в несколько раз, а объемы образующихся лунок растут на 1–2 порядка. Таким образом, важно, чтобы возникновение искровых разрядов происходило при достижении импульсами напряжения заданной величины или с запаздыванием не более 0,15–0,25 мкс.

Влияние электрического сопротивления разрядного контура на формообразование деталей

Основное свойство электроискрового формообразования деталей тонкой вольфрамовой или молибденовой проволокой — существенное электросопротивление разрядного контура при применении проволоки диаметром менее 50 мкм, особенно вольфрамовой. Зависимость электросопротивления вольфрамовой проволоки ВА-3 от ее диаметра пред-



Рис. 112. Влияние запаздывания разряда на его энергию W_p

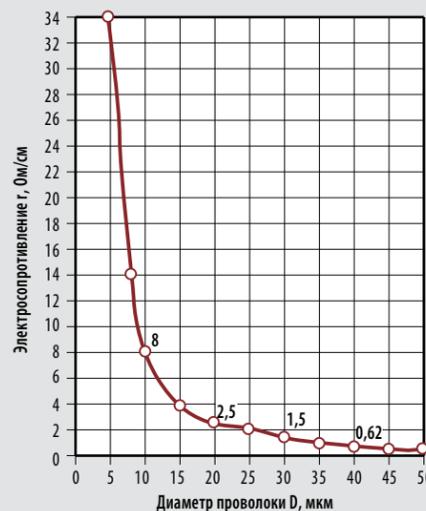


Рис. 113. Зависимость электросопротивления вольфрамовой проволоки ВА-3 от ее диаметра

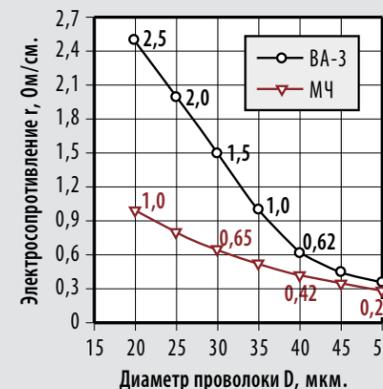


Рис. 114. Зависимость электросопротивления проволоки ϕ 20–50 мкм (вольфрамовой ВА-3 и молибденовой МЧ) от диаметра

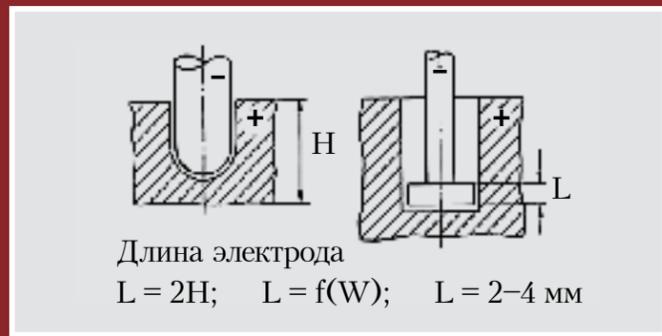


Рис. 115. Схема обеспечения стабильности условий удаления продуктов эрозии из зазора копированием профиля электрод-инструмента

ставлена на рис. 113, а молибденовой МЧ — на рис. 114 (в сравнении с ВА-3). Электросопротивление молибденовой проволоки МЧ существенно меньше, чем ВА-3 (например, для $\varnothing 20$ мкм в 2,5 раза). Так как при изготовлении многих деталей электронных приборов и миниатюрного инструмента расстояние между токоподводами не превышает 10–20 мм, очевидно, что электрическое сопротивление отрезка проволоки, включенное в разрядный контур, может составлять от единиц до десятков Ом для вольфрама $\varnothing 5$ –20 мкм и 1–2 Ома для молибдена $\varnothing 30$ –50 мкм. Вместе с тем было установлено, что электрическое сопротивление разрядного контура не должно превышать 0,03–0,04 Ом, так как даже незначительное превышение этой величины приводит к резкому падению эффекта эрозии. Это убедительно было показано еще в работах Б.Р. и Н.И. Лазаренко в середине 1940-х гг.

Стабильность условий удаления продуктов эрозии из зазора и влияние этого на эффективность процесса

В связи с увеличением длительности и уменьшением энергии искрового разряда возрастает доля металла, выбрасываемая из лунки в жидкокапельном состоянии, что приводит к существенному ухудшению эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки и к значительному увеличению размеров образующихся при этом микрозаусенцев по кромкам.

Поэтому изыскание путей уменьшения микрозаусенцев, образующихся даже при электроискровой прецизионной обработке, имеет большое значение для улучшения качества изготавливаемых миниатюрных деталей,

особенно в тех случаях, когда шероховатость обработанной поверхности не должна превышать десятых долей микрометра.

Эффективность процесса электроискровой обработки можно существенно повысить. Для этого необходимо сделать так, чтобы по мере внедрения электрод-инструмента в обрабатываемую деталь не происходило бы ухудшения условий протекания процесса из-за уменьшения зоны взаимодействия между инструментом и деталью. Это обеспечивало бы создание стабильных естественных условий удаления продуктов эрозии из межэлектродного зазора.

Поверхности заданной формы могут быть образованы электроискровым способом одним из следующих приемов:

- ♦ копированием профиля электрод-инструмента;
- ♦ вырезанием электродом-проволокой.

В первом случае электрод-инструмент, представляя негативное изображение обрабатываемого профиля, размеры которого уменьшены (при обработке внутренних поверхностей) или увеличены (при обработке наружных поверхностей) на двойную величину межэлектродного зазора, постепенно внедряется в обрабатываемую деталь на необходимую глубину или пронизывает ее насквозь (рис. 115).

Обычно длину электрод-инструмента выбирают такой, чтобы имелась возможность калибровки изготавливаемого отверстия за счет введения в работу неизношенной части электрода. При этом длина его рабочей части должна значительно превышать толщину изготавливаемой детали. Иногда приходится использовать несколько электродов.

При изготовлении деталей по этой схеме при любых условиях неизбежна конусность обрабатываемого отверстия или наружной поверхности. Это объясняется тем, что в зоне обработки наряду с необработанной частью детали постоянно находится уже обработанная ее часть, и зона взаимодействия между электрод-инструментом и деталью, простираясь на значительную длину, существенно ухудшает удаление продуктов эрозии из межэлектродной зоны по мере внедрения электрод-инструмента в деталь. Устранить этот недостаток можно одним из следующих способов.

- ♦ Торец электрод-инструмента заостряется подобно тому, как это происходит при его

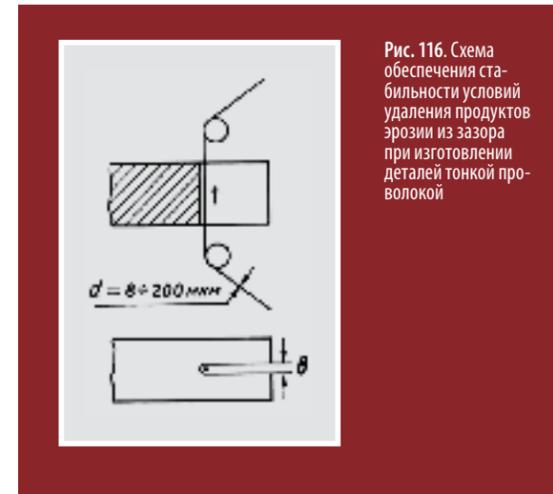


Рис. 116. Схема обеспечения стабильности условий удаления продуктов эрозии из зазора при изготовлении деталей тонкой проволокой

естественном износе по мере изготовления деталей. Этот прием приводит к существенному уменьшению времени изготовления отверстия, особенно при малой толщине деталей (до нескольких миллиметров).

♦ Длина электрод-инструмента L (т. е. зона взаимодействия между инструментом и деталью) выбирается минимально возможной. Эта величина определяется режимом обработки и сечением обрабатываемого отверстия или стержня. Малая зона взаимодействия между электродами (инструментом и деталью) обеспечивает хорошие естественные условия для удаления продуктов эрозии с поверхностей, благодаря чему отсутствует конусность, увеличивается интенсивность процесса и сокращается путь, преодолеваемый ими.

Однако несмотря на любые усовершенствования метод изготовления деталей копированием профиля электрод-инструмента имеет существенные недостатки:

- ♦ необходимо применять электрод, точно воспроизводящий профиль изготавливаемой детали;
- ♦ электродом определенного профиля можно изготовить деталь только подобного профиля;
- ♦ изготовление электрод-инструментов требует дополнительных затрат;
- ♦ невозможно изготовить электроды с острыми углами (радиусами меньше 0,03 мм);
- ♦ необходимо точное ориентирование оси электрод-инструмента по направлению его движения (подачи).

Этих недостатков лишен метод изготовления деталей тонкой проволокой, непрерывно движущейся с определенной скоростью вдоль своей оси (рис. 116). У него есть, пожалуй, только один недостаток — необходимость от-

верстия для завода электрода-проволоки в случае вырезания внутреннего профиля.

Однако при применении тонкой проволоки из молибдена или вольфрама появляется еще один недостаток — их значительное электрическое сопротивление (от сотых до десятых долей Ом/мм — для диаметров от 50 до 20 мкм и от десятых долей до нескольких единиц Ом/мм — для диаметров от 15 до 5 мкм).

Таким образом, при вырезании деталей толщиной 10 мм проволокой $\varnothing 30$ мкм сопротивление разрядного контура будет уже на порядок больше — 0,5–1,5 Ом, а для проволоки $\varnothing 9$ мкм — 10 Ом. Это увеличивает длительность искрового разряда и уменьшает его удельную мощность.

Примененная методика определения эффективности электроискрового процесса с помощью интерферометра по характеру лунок, образующихся на полированной поверхности материала после воздействия искровых разрядов, позволила установить:

- ♦ зависимость между диаметром лунки D , ее глубиной h , объемом удаляемого материала V и размерами валика по периферии лунки с энергией импульса;
- ♦ влияние рельефа эрозионных лунок не только на шероховатость обработанной поверхности Ra , но и на размеры микрозаусенцев на кромках прорезаемых пазов, а также удельную величину эрозии и скорость формообразования;
- ♦ влияние межэлектродного промежутка L на удельную эрозию K , и размеры лунок (диаметр D , глубину h , объем V) для различных энергий импульса W_0 ;
- ♦ влияние межэлектродного промежутка на эрозию анода (обрабатываемую деталь) и катода (электрод-инструмент), что позволило установить его оптимальные значения, на которых следует вести обработку (когда потери энергии W_n в канале разряда уменьшаются почти втрое, а энергия W_p , выделяющаяся на электродах, увеличивается более чем в 2 раза);
- ♦ нарушение стабильности канала разряда и переход искровой формы разряда в дуговую при микронных промежутках, когда эрозия анода и катода резко падает, становясь одинаковой на аноде и катоде и подобной следам воздействия микродуговых разрядов;

♦ влияние запаздывания начала искрового разряда с момента возникновения импульса напряжения на эффективность эрозии, когда с уменьшением запаздывания с 1,0–1,5 мкс до 0,25 мкс энергия импульса W_p увеличивается в несколько раз, а объемы образующихся лунок — на 1–2 порядка.

9. Специализированное электроискровое прецизионное оборудование НПО «Исток»

В конце 1950-х — начале 1960-х гг. наряду с электроискровым оборудованием для изготовления инструмента и деталей электронных приборов в НПО «ИСТОК» создавалось и специализированное электроискровое оборудование. Оно было представлено такими моделями, как:

- ♦ двухпозиционные установки А207.10; А207.15 и ЭХ1087. У всех этих машин электрод-проволока перемещался горизонтально, что создавало наилучшие условия для его направления в сторону обрабатываемой заготовки и удаления продуктов эрозии из зоны обработки, однако несколько ограничивало область применения этого оборудования;

- ♦ четырехпозиционная установка А207.11 для изготовления пуансонов, предназначенных для холодного выдавливания анодных блоков магнетронов типа «щель-отверстие», пуансонов и матриц вырубных штампов;

- ♦ модификации установок для изготовления замедляющих систем ЛОВ с электро-механическим программным управлением на шаговых искателях либо заданием программ с помощью перфолент или набором на панели управления установки;

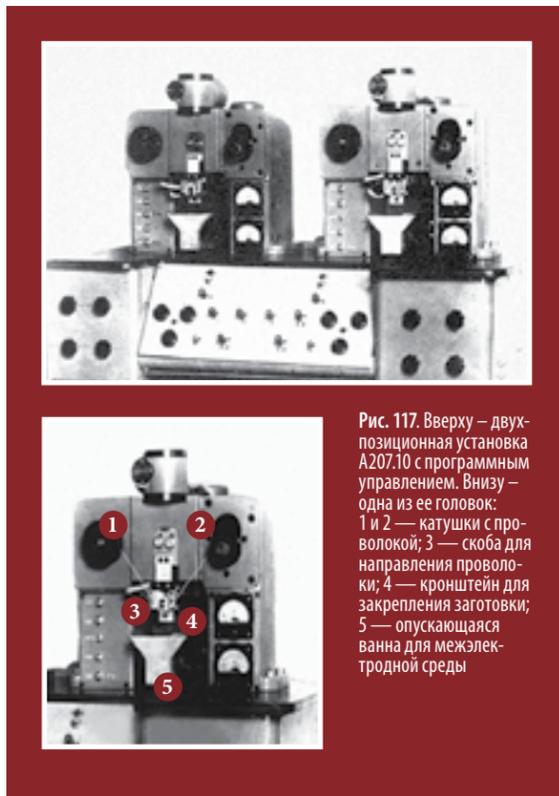


Рис. 117. Вверху — двухпозиционная установка А207.10 с программным управлением. Внизу — одна из ее головок: 1 и 2 — катушки с проволокой; 3 — скоба для направления проволоки; 4 — кронштейн для закрепления заготовки; 5 — опускающаяся ванна для межэлектродной среды

- ♦ установка А207.20 для изготовления деталей электродом-проволокой по увеличенному чертежу или шаблону на базе проектора БП;

- ♦ экспериментальная установка А207.24 для разрезания сеточного полотна из вольфрамомолибденовой проволоки \varnothing 20–30 мкм на керамическом керне;

- ♦ пятипозиционный полуавтомат А207.28 для разрезания тонкостенных никелевых профильных трубок \varnothing 2,5–3 мм молибденовой проволокой \varnothing 40 мкм с производительностью до 1000–1800 деталей в час;

- ♦ установка А207.31 с программным управлением для прорезания очень узких пазов (шириной 8–10 мкм);

- ♦ установка А207.37 на базе часового проектора ЧП-2 для изготовления деталей микроприборов электродом-проволокой по увеличенному чертежу или шаблону.

Ниже приводятся примеры некоторых из этих установок, а также описание их технических возможностей.

Двухпозиционная установка А207.10 с программным управлением

Установка А207.10 (рис. 117) предназначена для разрезания на таблетки различных прутков и штабиков из любых токопроводящих и некоторых полупроводниковых материалов диаметром до 15 мм. В качестве инструмента используется медленно перемещающаяся тонкая проволока \varnothing 30–40 мкм. Шероховатость обработанной поверхности $Ra \leq 0,5$ –1 мкм. Скорость разрезания 2–10 мм²/мин. Перемещение на требуемый шаг после каждого реза осуществляется автоматически по заданной программе с точностью до $\pm 0,005$ мм.

Главное назначение установки — изготовление очень прозрачных сеток с шестигранной формой ячеек и высокими перемычками (так называемых сотовых сеток) для электронных приборов (рис. 118). Основные элементы технологического цикла при этом сводятся к следующему: алюминиевую проволоку круглого сечения покрывают слоем меди, по толщине несколько превышающим половину толщины перемычки (а затем в некоторых случаях — тонким слоем золота), пучок такой проволоки вставляется в медную обойму и обжимается при протягива-

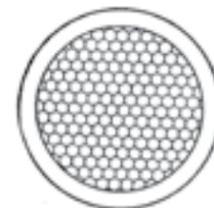


Рис. 118. Схематическое изображение сетки из сот



Рис. 119. Электроискровая полуавтоматическая прецизионная установка А207.11

Рис. 120. Стальной пуансон \varnothing 50 мм (а), изготовленный методом электроискрового «обратного» копирования, и медный анодный блок (б) типа «щель-отверстие», выдавленный этим пуансоном



Рис. 121. Электрод-инструменты для изготовления пуансонов: а) блок из 6 электродов; б) отдельный электрод в приспособлении

нии сквозь фильеру. В ходе обжима проволока приобретает шестигранную форму. Диффузия золота в медь обеспечивает более прочное (чем при отсутствии золочения) соединение отдельных проволок пучка между собой и образование единого стержня. Стержень нарезается электроискровым способом на тонкие диски. В дальнейшем алюминий вытравливается щелочью, которая на медь почти не оказывает воздействия. Так образуется сетка, которая после спекания при температуре плавления меди вплаивается в корпус резонатора прибора.

Четырехпозиционная установка А207.11

Электроискровая полуавтоматическая прецизионная установка А207.11 (рис. 119) была создана в основном для изготовления пуансонов

Таблица 5. Основные технические характеристики установки А207.11

Точность копирования геометрических форм электрода	2 класс
Шероховатость поверхности Ra , мкм	0,5–1
Количество позиций	4
Количество контуров на позиции	9
Число фиксированных режимов	6
Ход ползуна максимальный, мм	110
Межэлектродная среда	керосин
Емкость ванны, л	10
Габариты, мм	1260 × 740 × 1700
Вес установки, кг	1200

для холодного выдавливания анодных блоков магнетронов типа «щель-отверстие» (рис. 120), а также пуансонов и матриц вырубных штампов. Отличительная особенность установки — высокая точность и жесткость ее механической части.

На рис. 121 в качестве примера показан блок электродов-инструментов (а) для изготовления пуансонов и отдельный электрод в приспособлении (б), установленном на столе установки.

Отдельные электроды представляют собой закаленные стальные пластины, в которые запрессовываются вкладыши из меди, ее сплавов или других материалов, обладающих высокой эрозионной стойкостью. Пакет заготовок электродов обрабатывается совместно.

Благодаря наличию установочных базовых плоскостей износившийся в процессе обработки электрод можно заменить новым из партии данного блока и тем самым практически исключить какие-либо погрешности, связанные с заменой электродов.

На установке А207.11 одновременно изготавливаются четыре пуансона, заготовки которых устанавливаются в держателях ползунков. На столах закрепляются приспособления, изображенные на рис. 121, б и предназначенные для установки пластин электродов-инструментов. Приспособления соответствующим образом выверяются по отношению к заготовкам.

По мере износа пластина электрода на 1-й позиции заменяется новой из блока электродов, а несколько изношенная используется на 2-й позиции для предварительной обработки 2-й заготовки пуансона. Со 2-й позиции еще не полностью изношенный электрод перемещают на 3-ю, а затем на 4-ю. На 1-й позиции обработка завершается новой пластиной на заданный размер пуансона. После использования электродов на всех позициях процесс изготовления четырех пуансонов завершается. Технические характеристики установки приведены в табл. 5.

Двухпозиционная установка А207.15 для прорезания щелей в блоках магнетронов

Установка А207.15 (рис. 122) была создана в конце 1950-х гг. для прорезания электродом-проволокой $\varnothing 40$ мкм щелей шириной до нескольких миллиметров двумя проволоками в магнетронных блоках «Бисер» МИ-147 типа «щель-отверстие». Это делалось вместо операции пропиливания щелей механическим способом специальными пилами (из пружинной стали марки 65Г, закаленной до твердости HRC 57–59) на распиловочных машинках. Недостатком ранее применяемого способа были колебания инструмента в поперечном направлении.

Электроискровое прорезание щелей проволокой обеспечивало точность изготовления по ширине в пределах $\pm 0,003$ мм и шероховатость обработанной поверхности $Ra \leq 0,5$ мкм. Следовательно, этот процесс имел несомненные преимущества по сравнению с механическим способом, поскольку не требовал изготовления специального инструмента и обеспечивал наивысшую идентичность ширины пазов.

Принцип работы установки состоял в следующем: каждая из двух проволок перематывалась с катушек (1) на катушки (2) и натягивалась независимо друг от друга. Скоба для направления проволок имела сменные направляющие из твердого сплава с двумя пазами.

Модификации установок с программным управлением

В начале 1960-х гг. были разработаны системы цифрового программного управления электроискровыми прецизионными установками, предназначенными для изготовления замедляющих систем электронных приборов. Каретки координатных столов таких установок перемещались попеременно по осям X и Y, минимальная величина подачи равнялась 10 мкм. Несмотря на дискретность подач, на этих установках

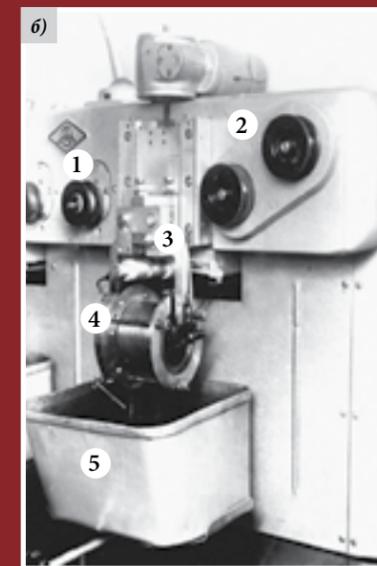
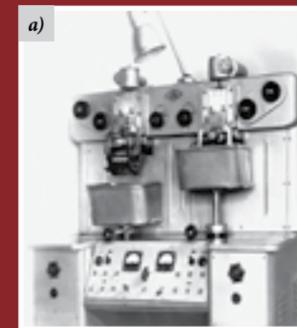


Рис. 122. а) Двухпозиционная установка А207.15 для прорезания щелей электродом-проволокой в блоках магнетронов «щель-отверстие»; б) Одна из позиций установки: 1 – приемная катушка проволоки; 2 – две катушки с проволокой; 3 – скоба для направления двух проволок; 4 – заготовка блока в спецприспособлении; 5 – опускающаяся ванна с межэлектродной средой

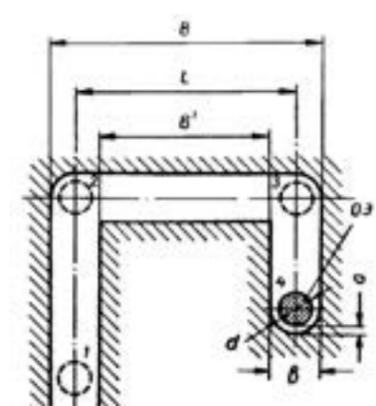


Рис. 123. Схема электроискровой обработки электродом-проволокой: ОЭ – электрод-проволока; 1-2-3-4 – траектория перемещения проволоки

при необходимости можно было изготавливать детали с формой любой степени сложности, причем с вполне удовлетворительной точностью и чистой обработанной поверхностью.

Расчет программы изготовления детали сводился к определению центра электрода-проволоки. При этом учитывался диаметр электрода-проволоки, величина пробивного расстояния, глубина образующихся лунок и максимальная высота образующихся микронеровностей.

На рис. 123 представлена схема перемещения электрода-проволоки при изготовлении замедляющих систем ЛОВ.

При этом для получения размеров B и B' электрод-проволока перемещался на величину

$$L = B - b, \\ B = d + 2a,$$

где $a = l + h - R_z$,
 b – ширина прорезанного паза;
 d – диаметр электрода-проволоки;
 a – зазор между электродом-проволокой и деталью;
 l – искровой промежуток;
 h – глубина лунки;
 R_z – максимальная величина микронеровностей, определяемая размерами лунок и степенью их перекрытия.

Известно, что любой сложный контур интерполируется отрезками прямых линий. Поэтому с помощью систем программного управления с последовательными дискретными подачами по осям X и Y на данных установках можно было изготовить любой контур с высотой микронеровностей не более 5–10 мкм и реальной точностью обработки 10–20 мкм.

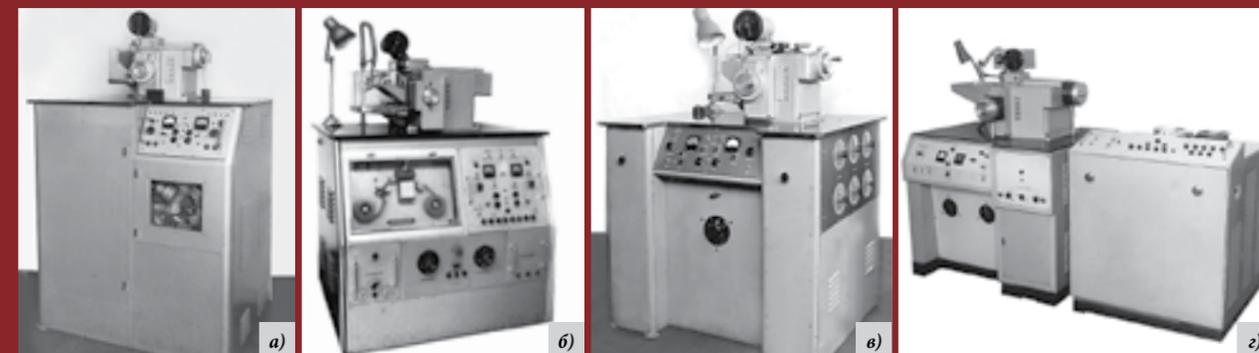


Рис. 124. Модификации установок с программным управлением для изготовления миниатюрных ЗС ЛОВ электродом-проволокой. Программы задаются: а, б, г) с помощью перфолент; в) электромеханическими устройствами на базе шаговых искателей



Рис. 125.
Установка А207.31
с программным
управлением
для прорезания
пазов шириной
8–10 мкм

На рис. 124 (а–з) изображены различные модификации электроискровых установок с программным управлением, предназначенных для изготовления миниатюрных замедляющих систем ламп обратной волны миллиметрового диапазона. В качестве обрабатываемого электрода использовалась вольфрамовая проволока ВА-3 \varnothing 0,02–0,03 мм. Направляющими элементами служили твердосплавные пластины, припаянные к П-образной скобе, которая изолировалась от корпуса установки. В твердосплавных пластинах оба паза (верхний и нижний) прорезались электроискровым способом электродом-проволокой. Это гарантировало их точное взаимное расположение. Оптимальные скорости перематки и усилие натяжения электрода-проволоки обеспечивались взаимодействием двух электродвигателей.

На рис. 125 представлена установка А207.31 для изготовления медных замедляющих систем субмиллиметрового диапазона длин волн. Размеры штырей таких систем не превышали 10–15 мкм, а шаг их расположения — 20–30 мкм. Для их изготовления использовалась вольфрамовая проволока \varnothing 6–12 мкм. Программа обработки задавалась на передней панели установки.

Для замедляющих систем, как и для резонаторов, важно, чтобы неточность выполнения основных размеров (в случае систем субмиллиметрового диапазона — размеров, существенно влияющих на дисперсионную характеристику) была не выше 1 % от номинала. Эта цифра ориентировочная, она определяется опасностью расфазировки электронов и волны вдоль оси системы, так как ее общая длина может составлять сотни шагов.

Электроискровой способ оказался в данном случае незаменимым и, что важно, легко осуществимым. Благодаря его применению появился совершенно новый уникальный класс электронных приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн.

Полуавтомат для электроискрового разрезания тонкой металлической трубки А207.28

В электровакуумном приборостроении нередко возникала необходимость разрезания большого количества тонких металлических (например никелевых) трубок различного профиля на небольшие куски. При этом одно из основных требований к качеству реза — минимальная величина заусенцев. Предлагаемые

различные способы механической резки круглых трубок, как правило, требовали последующей операции по удалению заусенцев. Трубки же некруглого сечения нуждались еще и в дополнительной операции формовки. Электроискровой способ разрезания оказался свободен от этих недостатков.

Были проведены предварительные эксперименты по разрезанию тонких никелевых трубок постоянно обновляющейся молибденовой проволокой МЧ \varnothing 40 мкм. Они показали, что в момент окончания реза в еще не полностью разрезанной стенке трубки возникают деформации, которые, очевидно, связаны с внутренними напряжениями, приводящими к отгибанию незакрепленной части трубки вверх. При этом электрод-проволока заклинивается и обрывается. Это явление заставило принять дополнительные меры, чтобы обеспечить надежное закрепление трубки по всей ее длине.

Примененный для выполнения этой задачи полуавтомат А207.28 (рис. 126, а) имел 5 электроискровых трехконтурных головок с двумя проволоками в каждом контуре. Одна из головок показана на рис. 126, б. Она оснащалась всем необходимым для разрезания трубок: шестью электродами-проволоками, которые перематывались с катушек 1 на 3 приемные катушки 2. При этом электроды-проволоки проходили через блок направляющих скоб 5, закрепленных на ползуне 3. С целью уменьшения потерь блок конденсаторов 4 помещали поблизости от искрового промежутка. Три выхода от конденсаторов заканчивались тройной вилкой, вставляемой в гнезда блока скоб. Общий выход конденсаторов шел на токоподвод, пода-

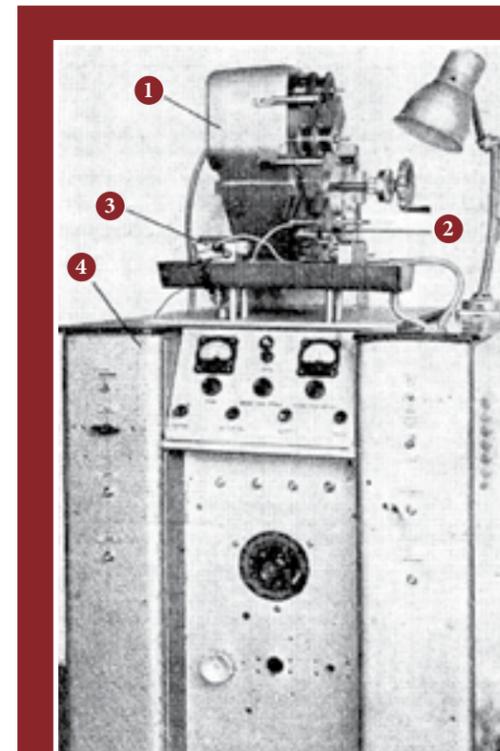


Рис. 128. Электроискровая установка для разрезания сеточного полотна:
1 — головка с блоком скоб;
2 — ползун;
3 — приспособление для крепления кернов;
4 — стол

ющий напряжение на кассету транспортирующего устройства 6, на котором крепилась заготовка разрезаемой трубки. Головка соединялась с кронштейном с помощью шарниров, которые позволяли откидывать ее во время заправки электродов-проволок.

Блок скоб (5) выполнял 3 функции: служил для направления шести электродов-проволок, обеспечивал подачу на них напряжения и подавал к межэлектродному промежутку дистиллированную воду. Отметим, что этот блок представлял собой быстросменный узел, при переналадке полуавтомата он легко заменялся другим. Направляющие элементы выполнялись из цилиндрических штабиков, изготовленных из керамики 22ХС (твердость по Моосу 9,4–9,6). Блок конденсаторов 4 располагался поблизости от искрового промежутка.

При разрезании трубок \varnothing 2,5–3 мм с толщиной стенки 0,1 мм на следующих режимах — напряжении 100 В, токи короткого замыкания 0,3 А, емкости 0,1 мкФ — производительность составляла порядка 1000–1500 шт. в час.

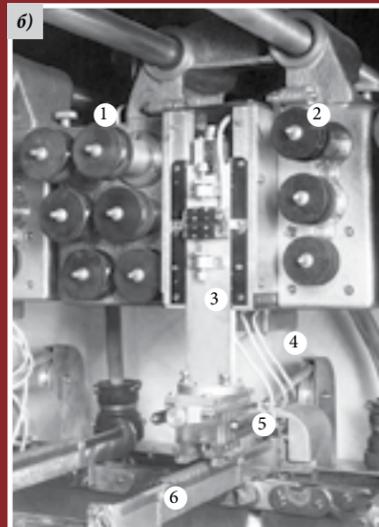


Рис. 126.
а) Полуавтомат А207.28 для разрезания тонкой никелевой трубки \varnothing 2,5–3 мм молибденовой проволокой \varnothing 40 мкм;
б) одна из его головок:
1 — шесть механизмов натяжения электродов-проволок с приемными катушками;
2 — три механизма перематки проволоки;
3 — ползун с блоком скоб (5) для направления шести проволок;
4 — блок конденсаторов

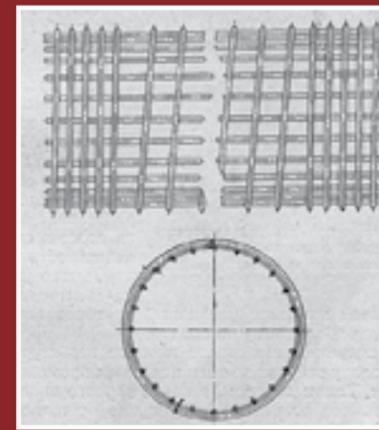


Рис. 127. Сеточное полотно. Траверсы изготовлены из вольфрамомолибденовой проволоки \varnothing 20–30 мкм, скрепленной поперечной навивкой

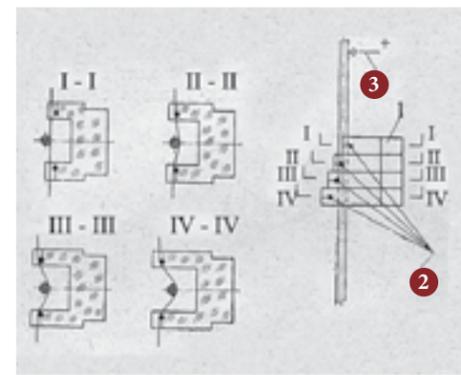
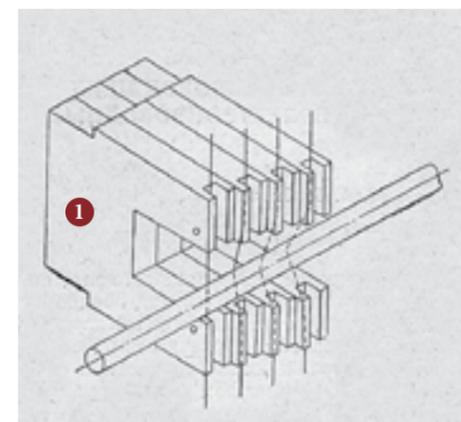


Рис. 129. Блок направляющих скоб для разрезания сеточных полотен: 1 — скобы; 2 — электрод-проволока; 3 — подвод тока к сеточному полотну



Рис. 130. Двухпозиционная установка А 207.91 для прорезания пролетных каналов (шириной 20–25 мкм) для замедляющих систем ЛОВ субмиллиметрового диапазона длин волн

Установка для разрезания сеточного полотна

Сеточное полотно (рис. 127) изготавливается на специальных сетконавивальных автоматах и представляет собой несколько десятков траверз из вольфрамомолибденовой проволоки $\varnothing 20\text{--}30$ мкм, уложенных по образующим цилиндрического керна $\varnothing 1,5\text{--}5$ мм и скрепленных поперечной навивкой. Керны проходят соответствующую термообработку для спекания витков поперечной навивки с продольными траверсами.

Ранее разрезание сеточного полотна на отдельные части производилось вручную при помощи специальных ножей. При этом торцы сеток получались расплюснутыми и с заусенцами. Проблема разрезания полотна без заусенцев была решена путем применения электроискрового способа с использованием в качестве электродов-инструментов нескольких постоянно перематывающихся молибденовых проволок $\varnothing 40$ мкм. Процесс протекал в дистиллированной воде, подаваемой в зону обработки. Для увеличения производительности разрезание полотна велось одновременно 4 электродами-проводами.

На рис. 128 представлена электроискровая установка для разрезания сеточного полотна. Она состоит из головки 1, в которой перемещается ползун с блоком скоб 2, приспособления для крепления кернов 3 и стола 4. В столе размещаются электрическая схема и насосная станция. В качестве обрабатываемого электрода используется молибденовая проволока МЧ-II $\varnothing 40$ мкм. Процесс обработки протекает в дистиллированной воде, подаваемой в зону обработки поливом, с сопротивлением 100–500 кОм на 10 мм длины. Для увеличения производительности процесса разрезание полотна ведется одновременно 4 электродами-проводами.

На рис. 129 показан ступенчатый блок скоб 1. Это позволяет в рабочем положении каждому электроду-проволоке 2 иметь разный угол охвата керна (сечения I-I, II-II и т. д.). Перегибы электродов-проводок относительно обрабатываемого керна обеспечивают полное разрезание сеточного полотна даже в случае сабельной формы керна. Угол его охвата электродами-проводами различен, причем наиболее удаленный от токоподвода 3 имеет наибольший угол охвата. Подобное увеличение угла вызвано необходимостью обеспечить надежную подачу энергии ко всем искровым промежуткам при окончании разрезания.

Применение этой установки позволило получать сетки практически без следов заусенцев на траверзах с производительностью от 100 до 150 сеток в час.

Установка для прорезания пазов шириной 20–25 мкм в деталях большой длины

Двухпозиционная электроискровая установка (рис. 130) была создана специально для изготовления пролетных каналов замедляющих систем ламп обратной волны субмиллиметрового диапазона (рис. 131, 132).

Каналы представляют собой пазы шириной 20–25 мкм, которые прорезаются электродом-проволокой $\varnothing 15\text{--}20$ мкм шагом 40–50 мкм в целых медных заготовках длиной 25 мм. Число каналов может достигать до 5–6, прорезаемых на лезвии шириной от 0,1 мм до 0,3 мм. Обычно длина каналов составляет 20–25 мм.

После изготовления пролетных каналов в гребенках осуществляется прорезание пазов ЗС ЛОВ электродом-проволокой $\varnothing 8\text{--}12$ мкм на установке А207.69 поперек этих каналов (рис. 133). На рис. 134 показан участок замедляющей системы ЛОВ субмиллиметрового диапазона волн с пазами шириной 10 мкм, прорезанных электродом-проволокой $\varnothing 8$ мкм на глубину 50 мкм.

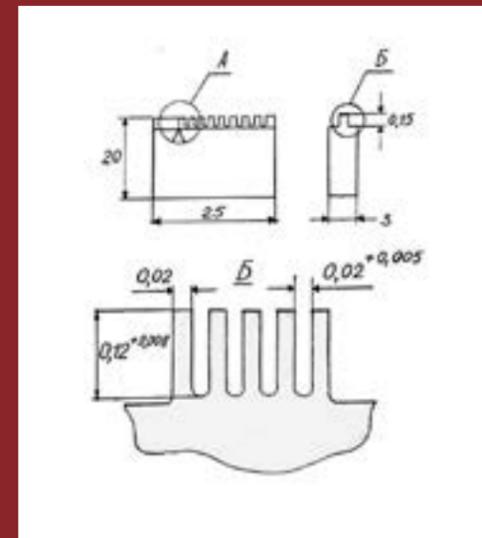


Рис. 131. Пролетные каналы замедляющей системы ЛОВ субмиллиметрового диапазона

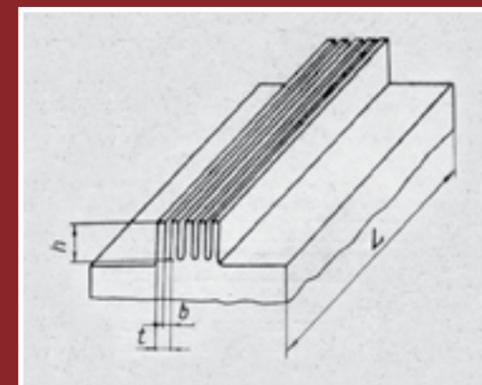


Рис. 132. Гребенка ЗС с пролетными каналами шириной $b = 20$ мкм, глубиной $h = 120\text{--}150$ мкм, шагом $t = 40\text{--}50$ мкм, длиной $L = 25$ мм



Рис. 133. Установка А 207.69 для изготовления ЗС ЛОВ субмиллиметрового диапазона волн электродом-проволокой $\varnothing 8\text{--}12$ мкм

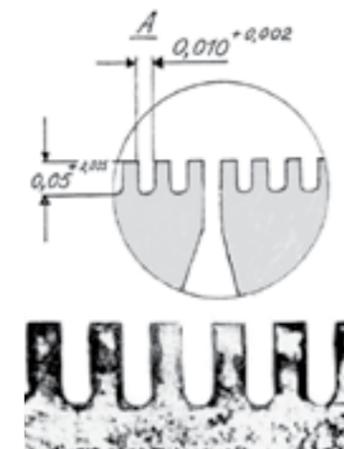


Рис. 134. Участок замедляющей системы ЛОВ субмиллиметрового диапазона с пазами шириной 10 мкм, прорезанными электродом-проволокой $\varnothing 8$ мкм на глубину 50 мкм

Станок для разрезания полупроводниковых пластин

К моменту появления электроискровой обработки в промышленности уже были освоены технологические приемы, позволяющие обрабатывать полупроводниковые материалы, например, резка алмазными дисками, фотолитграфическое гравирование, ультразвуковое долбление и др. Однако эти способы обладают рядом существенных недостатков. Даже при

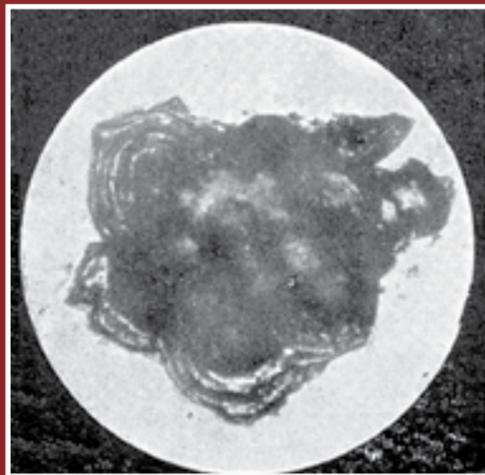


Рис. 135. Лунка на полированной поверхности германия: $W = 1000 \text{ мкДж}$

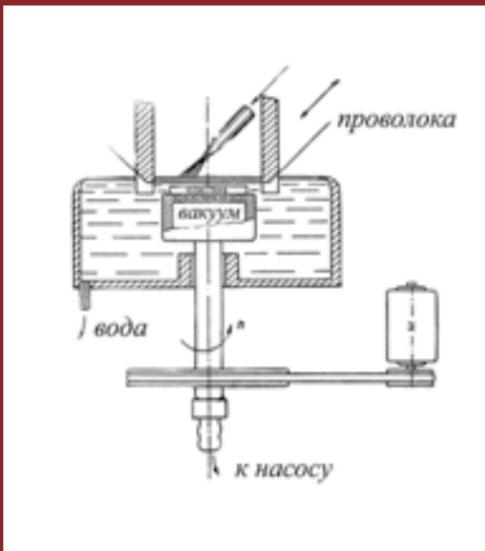


Рис. 136. Схема устройства с вращающимся столиком для шлифования полупроводниковых материалов электродом-проволокой

разрезании весьма тонкими алмазными дисками (толщиной до 0,22 мм) отходы составляют от 50 до 80 %. Чрезвычайно высокая хрупкость или малые размеры некоторых интерметаллических полупроводников (SiC, GaP и т. д.) требуют виртуозных технологических приемов при вырезании из них механическими методами кристаллов, строго ориентированных относительно кристаллической решетки.

Задача существенно облегчилась благодаря применению электроискрового способа обработки полупроводниковых материалов. В некоторых случаях, например, при выделении активной области на переходах мощных транзисторов, она успешно конкурирует с фотолито-

графическим способом, отличаясь от него простотой и высокой точностью процесса.

Как известно, полупроводниковые материалы отличаются монокристаллическим строением, отсутствием пластичности и чрезвычайно высокой хрупкостью и ранимостью поверхности. Это обстоятельство приводит к образованию лунок специфической формы, изображенных на рис. 135.

На рис. 136 показана схема устройства для обработки плоской поверхности электродом-проволокой. Горизонтальный вращающийся стол-карусель с вакуумным прижимом обработан с высокой точностью по плоскости. Электрод-проволока перематывается и совершает небольшие возвратно-поступательные движения в плоскости стола и перпендикулярно к направлению перематывания, в результате чего появляется возможность проводить размерную обработку пластины с высокой точностью.

На рис. 137–138 представлены фотографии микроструктур поверхностей кремния и германия, обработанных электроискровым способом на вращающемся столике.

На рис. 139 показан электроискровой станок ЖК.94.10 для разрезания полупроводниковых пластин из германия в струе деионизированной воды электродом-проволокой $\varnothing 0,03\text{--}0,06 \text{ мм}$. Вода подается автоматически через электромагнитный кран только во время обработки. Столу с размещенным на его поверхности обрабатываемым материалом можно задавать необходимый угол наклона и перемещать его в горизонтальной плоскости по 2 направлениям. Станок также снабжен реле глубины. Проволока натягивается с помощью электродвигателей АДП-262, включенных в тормозном режиме. Каждый двигатель регулируется независимо, что позволяет работать как одной, так и двумя проволоками разного сечения и материала.

Станок ЭХ1278 для изготовления трафаретов

На рис. 140 показан внешний вид электроискровой установки ЭХ1278 для изготовления трафаретов, которая была спроектирована на базе координатного стола универсального измерительного микроскопа УИМ-21. Координатный стол обеспечивает легкость хода, отклонение от прямолинейности траектории движения не превышает в продольном направлении 1 мкм, поперечном — 2 мкм. Максимальное значение неперпендикулярности траектории движения продольного и поперечного ползунов, равное $\pm 10''$, тщательной юстировкой доводится до $\pm 4''$, что составляет $\pm 1 \text{ мкм}$ на длине хода 50 мм.

Схема изготовления трафаретов на установке ЭХ1278 приведена на рис. 141. В заго-

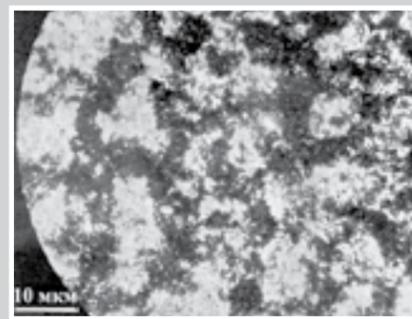


Рис. 137. Микроструктура поверхности кремния, обработанного электроискровым способом на вращающемся столике: $U = 150 \text{ В}$; $C = 500 \text{ пФ}$

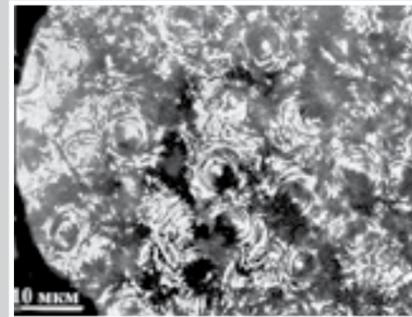


Рис. 138. Микроструктура поверхности германия, обработанной электроискровым способом на вращающемся столике: $U = 100 \text{ В}$; $C = 200 \text{ пФ}$



Рис. 139. Электроискровой станок ЖК.94.10 для разрезания полупроводниковых пластин

товке вырезается отверстие при подаче проволоки 5 через направляющее устройство 3. Далее этой же проволокой вырезается отверстие необходимой конфигурации путем перемещения детали относительно электрода-проволоки в перпендикулярной ей плоскости. Постоянство положения рабочего участка проволоки обеспечивается направляющими 3 и 2.

При обработке отверстия проволока подается роликами 4 и 7 в режиме регулирования межэлектродного промежутка. После формирования отверстия она захватывается пинцетом, пропускается через направляющую 2 и наматывается на катушку 1, которая вращается с постоянной скоростью. Натяжение

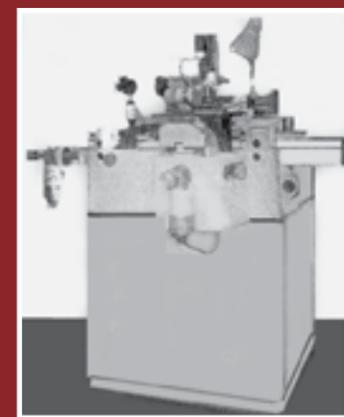


Рис. 140. Электроискровая установка ЭХ1278 для изготовления трафаретов

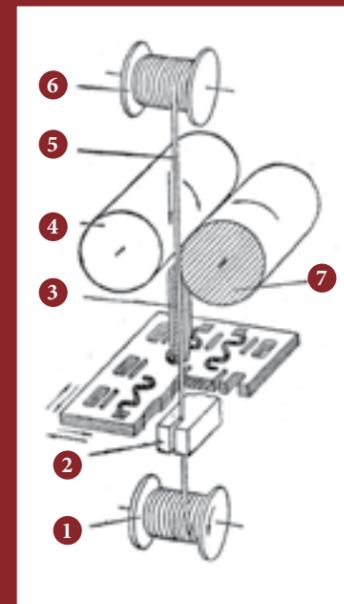


Рис. 141. Схема изготовления трафаретов на установке ЭХ1278 электродом-проволокой

проволоки производится электродвигателем, на который установлена приемная катушка 6. Перемещение детали в соответствующих направлениях создает сложный профиль отверстия. Затем проволока отрезается, и процесс повторяется.

Таким образом, на одной установке совмещены операции сверления отверстия для ввода электрода-проволоки и растачивания внутреннего контура сложной геометрии. При этом проволока автоматически вводится в отверстие, что позволяет получить узкую щель без расширяющейся части. Наименьший размер щели определяется диаметром электрода-проволоки и составляет 60 мкм.

10. Влияние отечественных электроискровых установок на развитие зарубежных аналогов



Рис. 143. Фраза «Прецизионная электроискровая обработка» вырезана в пластине ВК-6 толщиной 6 мм проволокой ВА-3 Ø 0,04

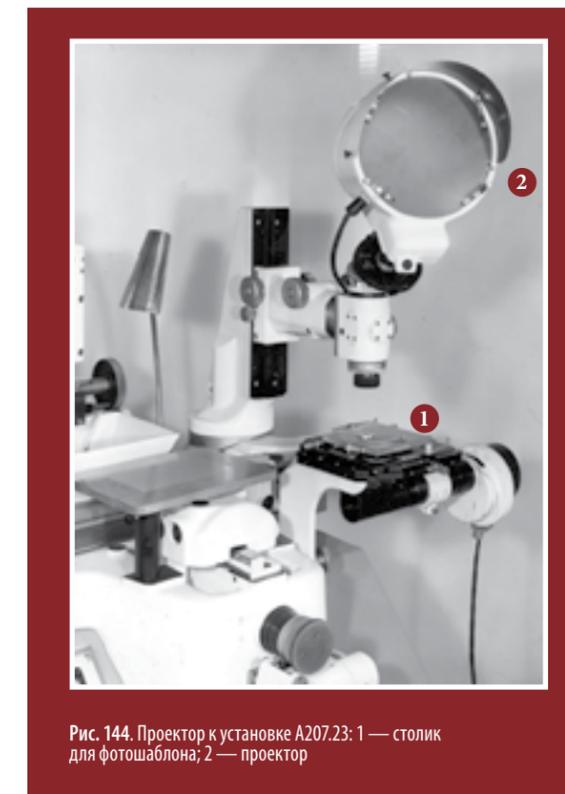


Рис. 144. Проектор к установке А207.23: 1 — столик для фотошаблона; 2 — проектор

До появления систем числового программного управления на базе персональных компьютеров изготовление сложнопрофильных деталей осуществлялось по увеличенным рисункам или чертежам, а также фотошаблонам. Для этого в СССР были разработаны электроискровые установки различных моделей: А207.20 (на базе большого проектора БП), А207.23 (на базе универсального измерительного микроскопа), а также А207.13/20 и А207.33 (на базе микроскопа БМИ-1). Их оптические устройства позволяли увеличивать изображение в 10–50 раз. На рис. 142 изображена установка А207.20 и крупный план устройства для закрепления заготовок детали скобы и ванны для межэлектродной жидкости.

На ней можно было работать двумя способами: либо чертеж, увеличенный до ф. А2, закреплялся на круглом столе проектора (рис. 143), либо проекция на предметный столик фотошаблонов увеличивалась на экране в 10–50 раз (рис. 144).

На рис. 145 представлены координатные установки А207.12 для изготовления деталей копированием профиля электрода-инструмента (слева) и электродом-проволокой (справа), созданные на базе универсального измерительного микроскопа УИМ — аналога микроскопа фирмы Карл Цейс.

На рис. 146 показана установка А.207.13/20 со встроенным тиратронным генератором импульсов, обеспечивающим изготовление деталей электродом-проволокой по увеличенному чертежу или шаблону, в качестве технологической жидкости использовалась обычная вода из водопровода.

Это оборудование впервые демонстрировалось в доме техники Будапешта (Венгрия) на специальной выставке отечественного электронного оборудования в ноябре 1964 г. В марте 1965 г. на юбилейной 800-летней Лейпцигской ярмарке установки А207.13/20 и А207.23 (модификация А207.12) получили высокую оценку зарубежных специалистов и золотую медаль. В октябре 1966 г. электроискровые координатные установки А.207.23 и А.207.13 были представлены в Италии на промышленном салоне в Турине, причем модель А.207.23 прямо с выставки была продана фирме Olivetti. Это послужило началом многолетнего сотрудничества НИИЭТМЭП СССР (НИИ-160) с этой фирмой. Распределение задач было следующим: Olivetti разрабатывало системы числового программного управления, а НИИ «Исток» — электроискровые станки, но об этом несколько позже.

В конце 1966 г. установки А207.23 и А207.13 демонстрировались в японском городе Осака. В том же 1966 г. установка А207.23

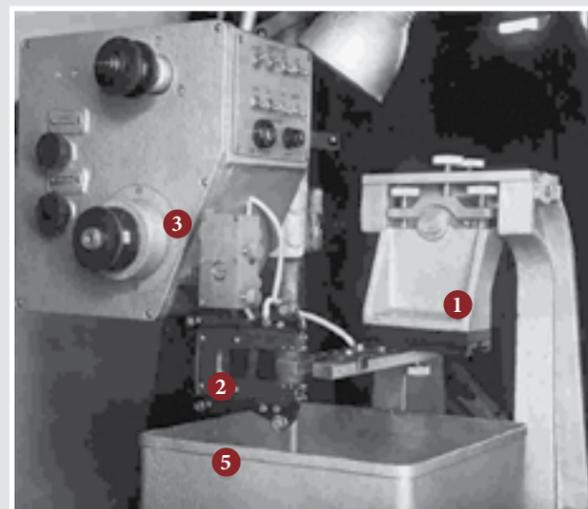
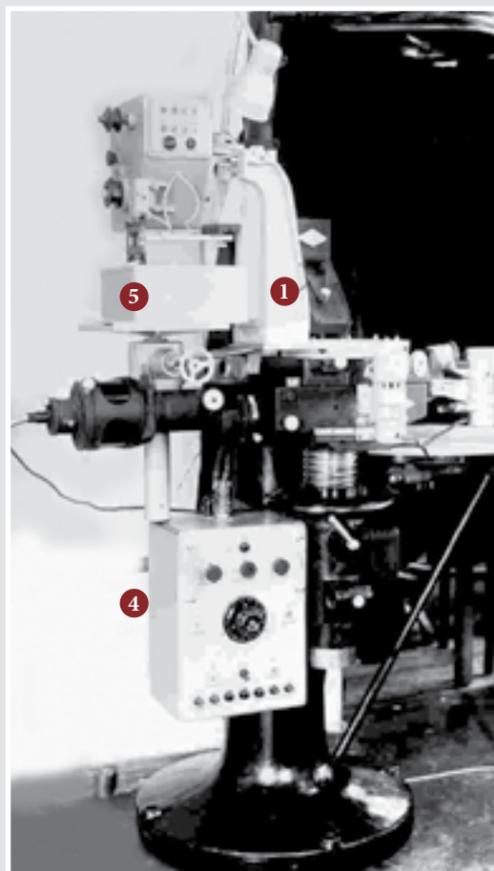


Рис. 142. Электроискровая установка А207.20: 1 — кронштейн с приспособлением для закрепления и выверки заготовки; 2 — скоба для направления проволоки; 3 — катушка с проволокой ВА-3 Ø 0,04 мм; 4 — блок питания; 5 — ванна, поворотный стол

была представлена в Загребе, а на международной ярмарке в Брно она, вместе с координатной установкой A207.30, была отмечена золотой медалью. В 1967 г. установка A207.23 демонстрировалась в Монреале в течение полугода. В 1966–1969 гг. было экспортировано несколько десятков электроискровых установок – в Италию, Японию, Канаду, Великобританию, Францию, Польшу, ФРГ, Аргентину, ЧССР, Болгарию. Следует отметить, что в начале 1950-х гг., т. е. спустя 7–10 лет после официальной регистрации электроискрового способа обработки металлов в СССР и получения патента в 1946 г., за границей были начаты первые разработки и производство электроискрового оборудования. Так, в 1953 г. К. Иноуэ зарегистрировал первую в Японии и одну из первых в мире лабораторию электроискровой обработки металлов и компанию Jарах по производству электроискровых станков. Несколько позже к разработке и производству электроискрового оборудования приступили швейцарские фирмы AGIE (AG fur industrielle Elektronik) и Charmilles

После демонстрации советского электроискрового оборудования для изготовления деталей электродом-проволокой в ноябре 1964 г. на западном рынке в конце 1960-х гг. появилась вырезной станок AGIECUT-DEM-15 с генератором STM-D швейцарской фирмы AGIE (A.G. fur Industrielle Electronik). По сравнению со станками НИИ «Исток» он имел на порядок большую потребляемую мощность, меньшую реально получаемую точность, значительно меньшую производительность процесса при обработке деталей из сталей, твердых сплавов и меди (электродом-проволокой Ø 0,15 мм). В случае применения проволоки Ø 0,05 мм на станках фирмы AGIE достигалась производительность процесса не более 0,5 мм²/мин. В качестве среды использовалась деионизованная вода.

Ведущие специалисты фирмы Jарах в 1976 г. создали компанию FINE Sodick, ставшую в настоящее время мировым лидером в области электроискровой обработки. Между тем к концу 1980 г. японская фирма Fanuc, несмотря на существовавшее эмбарго на поставку систем CNC с управлением по четырем осям в Советский Союз, предложила использовать их на электроискровых станках, разработанных НПО «Исток». Уполномоченные представители фирмы готовы были подписать соответствующий контракт. Но, к сожалению, в 1980-е гг. прошлого столетия в условиях «железного занавеса» (изоляции от капиталистических стран) кооперация отечественных предприятий с зарубежными фирмами была невозможной. И, прежде

всего, использование опыта японских фирм в связи с существующим эмбарго на поставку в Союз систем ЧПУ на базе CNC.



Рис. 145. Координатные установки A207.12 для изготовления деталей копированием профиля электрода-инструмента (слева) и электродом-проволокой (справа)



Рис. 146. Электроискровая координатная установка A.207.13/20

11. Создание электроискровых комплексов нового поколения (1970–1990 гг.)

Между тем, на Olivetti в это время, кроме нашей установки A207.23, уже было несколько проволочных электроискровых станков AGIECUT-DEM-15 с генератором STM-D, которые не устраивали специалистов фирмы из-за недостаточной производительности и точности формообразования.

Интерес, проявленный к нашему оборудованию, послужил началом сотрудничества с В/О «Техмашэкспорт» для продвижения созданного электронной промышленностью СССР электроискрового оборудования за рубеж и взаимодействия с иностранными торговыми фирмами: итальянской «СТАНИТАЛЬЯНА», японской «НИЧМЕН», английской KERRY MACHINE TOOLS LTD. и др. В салонах этих фирм демонстрировались прецизионные электроискровые установки, которые пользовались неизменно огромным успехом.

Фирма «СТАНИТАЛЬЯНА», офис которой находился в Генуе, имела салон в Милане и сервисное обслуживание на заводе в Ронко Скривия (близ Генуи). На рис. 147 представлен общий вид завода в Ронко Скривия (фирма SOCOMI). Здесь демонстрировались установки A207.23,

A207.27, A207.30 и A207.33, а также проводились их испытания. Специалистов фирмы Olivetti особенно привлекли возможности установки A207.27 для изготовления деталей электродом-проволокой и координатно-прошивочный станок A207.30. Ознакомившись с установкой A207.27, обеспечивающей многократное повышение про-



Рис. 147. Общий вид завода в Ронко Скривия (фирма SOCOMI)

изводительности процесса благодаря применению тиратронного генератора импульсов, позволяющего применять в качестве межэлектродной среды обычную воду из водопровода, высказали пожелание об увеличении координатных перемещений и оснащении ее системой ЧПУ. Возникла необходимость создания станочного модуля для изготовления деталей инструментального производства и соответствующей системы ЧПУ. Отделению «А» фирмы Olivetti, находящемуся в районе Сан-Бернардо-города-Иврея, предстояла разработка систем ЧПУ для электроискровых установок А207.23 и А207.27.

С этого момента для нашей электронной промышленности начался новый этап развития электроискровой обработки. Это был период сотрудничества с итальянской фирмой Olivetti — OCN и одновременно период проведения отраслевых комплексно-целевых программ «Электроника». Они предполагали создание пятого поколения электроискрового прецизионного оборудования — электроискровых прецизионных комплексов широкого применения с тиратронными и транзисторными генераторами импульсов, обеспечивающими изготовление деталей в обычной воде из водопровода для инструментального и основного производств с системами ЧПУ на базе мини- или микро-ЭВМ.

В результате в соответствии с пожеланиями зарубежных потребителей была создана электроискровая проволочная установка А207.60 (табл. 6) со встроенным тиратронным генератором импульсов, использующая в качестве межэлектродной среды обычную воду из водопровода. Она отличалась от установки А207.27:

- ♦ возможностью изготовления контуров размером 150 × 250 мм в деталях толщиной до 150 мм;
- ♦ трехкратным увеличением интенсивности формообразования;
- ♦ расширением области применения установки за счет оснащения ее сменным устрой-



Рис. 148. Электроискровая координатная установка А207.61 с тиратронным генератором импульсов А671.45 для изготовления деталей электродом-проволокой

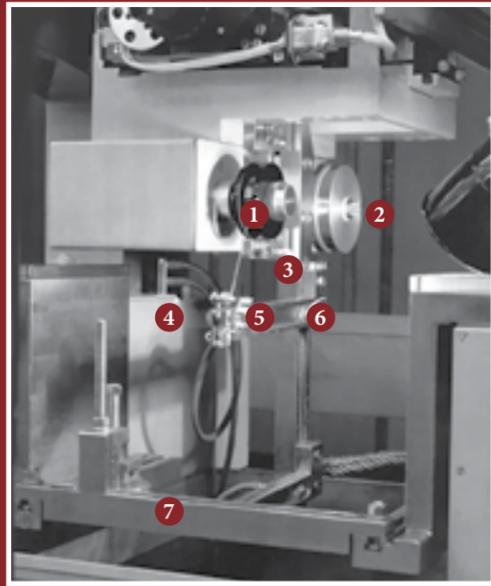


Рис. 149. Зона обработки станка А207.61: 1 — приемная катушка проволоки; 2 — катушка с проволокой; 3 — устройство выверки положения проволоки; 4 — импульсный трансформатор; 5 — керамические направляющие проволоки; 6 — регулируемый кронштейн; 7 — траверса для закрепления заготовки

Таблица 6. Основные технические характеристики установки А207.60

Максимальные габариты деталей, мм	390 × 330
Максимальная толщина деталей, мм	150
Перемещения, мм: по осям X-Y, мм	250 × 150
Погрешность перемещения по осям X-Y, мкм	± 5
Диаметр проволоки, мм	0,05–0,20
Расход проволоки, м/час	40–70
Межэлектродная среда	вода питьевая
Скорость вырезания при $R_a = 2$ мкм, мм ² /мин	30–80
Скорость прошивки при $R_a \leq 2$ мкм, мм ³ /мин	10–25
Габариты, мм	1840 × 850 × 1800
Наибольшая потребляемая мощность, кВА	2,5

ством для изготовления деталей методом копирования.

Установка А207.60, как и А207.27, не требовала применения специальных фильтров и деионизации воды. Использованная вода отводилась в канализационную систему. Увеличение скорости обработки было достигнуто благодаря применению тиратронного генератора импульсов, оригинальных

конструкторских решений и рациональной компоновки его основных функциональных блоков. Для установки А207.60 была выбрана компоновка координатного стола сверху над ванной, а размещение импульсного трансформатора — максимально приближенным к разрядному контуру.

Установка по технико-экономическим показателям превосходила аналоги, ранее созданные в СССР. За рубежом подобные образцы еще не появились. После демонстрации на ВДНХ этой установки представители фирмы Olivetti — OCN высказали пожелание об увеличении перемещений по обеим осям X-Y до 250 мм. В результате чего была создана электроискровая координатная установка А207.61 (рис. 148), состоящая из станочного модуля 04ИВ-250 (1) и тиратронного генератора импульсов модели А671.45 (2).

Станочный модуль включает в себя следующие основные узлы:

- ♦ прецизионный координатный стол с приводами подачи;
- ♦ механизмы перемотки и натяжения электрода-проволоки;
- ♦ механизм для направления проволоки и ориентации ее относительно обрабатываемой детали;
- ♦ механизм подъема ванны с рабочей жидкостью — водой из водопровода.

Координатный стол станка А207.61 размещается на двух С-образных чугунных колоннах, расположенных на жесткой чугунной плите с квадратным отверстием для опускающейся ванны с водой. В одну из колонн помещен импульсный трансформатор. Габариты обрабатываемых деталей — 430 × 270 мм, станка — 2 015 × 1 000 × 1 790 мм. Перемещения по осям X-Y увеличены до 250 × 250 мм. Предусмотрены места для крепления линейных датчиков ЧПУ. Направляющие для проволоки, как правило, — точно взаимно расположенные штифты из специальной керамики диаметром 2,5–3 мм. Их оригинальная конструкция позволяет использовать проволоку любого диаметра. Вместо них возможно применение алмазных направляющих конического типа. На рис. 149 показана зона обработки станка А207.61 с опущенной ванной. На рис. 150 — специалисты фирмы Rohstoff GmbH из ФРГ знакомятся со станком А207.61 на ВДНХ СССР.

Для создания комплексов ОТС-1 в Италию фирме «СТАНИТАЛЬЯНА» было поставлено 5 станков А207.61 с тиратронными генераторами импульсов. Станки были изготовлены в соответствии с нормами точности на электроэрозионные вырезные станки по ГОСТ 20551,

разработанным ЭНИМС. Проверка станков на точность координатных перемещений показала, что на длине 50 мм погрешность составила 20–25 мкм, на длине 100 мм — 35–40 мкм, а на длине 200 мм — превысила 70 мкм. Клиенты фирмы высказали пожелание о доведении точности координатных перемещений на всей длине хода до 10 мкм.

Это требование было выполнено на станке ОТС-2 (04 ИВ-250, модели А207.80) главным образом за счет изменения конструкции траверсы. На рис. 151 — электроискровой станок ОТС-2 перед отправкой в Италию, а на рис. 152 —



Рис. 150. Специалисты фирмы Rohstoff GmbH (Германия) знакомятся со станком А207.61



Рис. 151. Электроискровой станок 04ИВ-250 А207.80 (ОТС-2) перед отправкой в Италию



Рис. 152. Электроискровой комплекс ОТС-2 (на базе станка 04ИВ-250 А207.80) с ЧПУ фирмы Olivetti — OCN



Рис. 153. Комплекс «ЭЛИУР-90» (ЭХ 2214 Е5-400СН)



Рис. 154. Деталь с отходом, вырезанная на комплексе «ЭЛИУР-90»



Рис. 155. Комплекс 04ИВ-400 (слева направо): 1) УЧПУ 15ИПЧ-3-001; 2) гидроагрегат; 3) станочный модуль



Рис. 156. Система подготовки программ на базе мини-ЭВМ «Электроника ДЗ-28»

комплекс на базе этого станка с УЧПУ фирмы Olivetti — ОСН.

В середине 1980-х гг. для изучения серийно выпускавшегося за рубежом электроискрового оборудования для изготовления деталей электродом-проволокой в НИИ-160 были поставлены два комплекса AGIE-CUT 250 фирмы AGIE и OPTIMAT C фирмы SCHIESS-NASSOVIA (аналог комплекса фирмы Mitsubishi), в составе которых: станок, диэлектрик и устройство ЧПУ с генератором (в одном блоке). Это была инициатива ИГУ МЭП СССР, чтобы убедиться в возможности создания аналогичного отечественного оборудования для инструментального производства с автоматической заправкой проволоки, гидроагрегатами с деионизаторами воды и системами CNC. В соответствии с утвержденной программой такие работы были начаты. В результате был создан аналог AGIE — экспериментальный пятикоординатный комплекс с управлением по 5 осям «Элиур-90» (ЭХ2214), использующий воду из водопровода, которая затем подвергалась деионизации и подавалась под давлением в зону обработки. Станок имел систему автоматической заправки электрода-проволоки диаметром 0,1–0,3 мм (рис. 153). Он предназначался для изготовления деталей высотой до 160 мм, шириной 320 мм и длиной 600 мм. Перемещение кареток 400 × 250 мм. Накопленная погрешность перемещения (без коррекции) 10 мкм. На рис. 154 представлена деталь, изготовленная на данном станке. Честно говоря, создание такого комплекса для нас было шагом назад.

Одновременно с этим был разработан экспериментальный комплекс оригинальной компоновки 04ИВ-400 (рис. 155) с системой УЧПУ 15ИПЧ-3-001 с управлением по трем осям, гидроагрегатом и тиратронным генератором с импульсным трансформатором, встроенным в станочный модуль.

Но, как показали последующие испытания этого комплекса, он не обеспечивал необходимой точности изготовления деталей.

В течение почти десятилетия после появления в 1954 г. первых экспериментальных электроискровых установок для изготовления деталей электродом-проволокой широкому внедрению этого оборудования для изготовления сложнопрофильных деталей средних и больших размеров, особенно в инструментальном производстве, мешало, прежде всего, отсутствие систем ЧПУ на базе мини- или микро-ЭВМ, обладающих широкими возможностями управления оборудованием, высокой надежностью и помехоустойчивостью, а также простотой расчета управляющих программ. Поэтому в соответствии с отраслевой программой «Электроника — Искра» НПО «Исток» со-



Рис. 157. Электроискровой комплекс «Электроника-78»



Рис. 158. Электроискровой комплекс А207.79 с ЧПУ 15ИПЧ-3-001 (1)



Рис. 159. Электроискровой комплекс А207.81 с ЧПУ 15ИПЧ-3-001 (1)



Рис. 160. Электроискровой комплекс А207.86 с ЧПУ 15ИПЧ-3-001 (1)

вместно с НПО «Феникс» МЭП СССР к концу 1970-х гг. были разработаны первые отечественные электроискровые комплексы «Электроника» с системами ЧПУ 15ИПЧ-3-001 и освоено их серийное производство.

Электроискровой комплекс «Электроника-78Б» создан на базе станочного модуля 04 ИВ-250 (1), тиратронного генератора импульсов А671.45 (2), СЧПУ 15ИПЧ-3-001 (3), системы подготовки программ А745.34, мини-ЭВМ «Электроника ДЗ-28» (рис. 156) и пишущей машинки «Консул». На рис. 157 — общий вид этой системы.

Планомерное улучшение комплексов — отработка конструкций отдельных узлов, повышение их жесткости, применение новых керамических материалов с малым коэффициентом линейного расширения — способствовало появлению новых моделей и модификаций. Например, на комплексах А207.78 и А202.01 с тиратронными генераторами импульсов А207.54-50 погрешности перемещения кареток координатного стола были уменьшены в 2–3 раза по сравнению с первыми образцами комплексов «Электроника 77Б» и ОТС-1.

А точность комплексов модели А207.79 (рис. 158) и А207.80 (ОТС-2) с тиратронными генераторами А671.57 увеличена еще в 1,6 раза. На них гарантировались максимальные погрешности перемещения кареток координатного стола не более ± 5 мкм на всей длине хода.

На базе установки А207.23 были разработаны две модификации комплексов с СЧПУ 15ИПЧ-3-001: А207.81 для изготовления деталей электродом-проволокой (рис. 159) и А207.84 (координатно-прошивочный комплекс) с тиратронными генераторами импульсов модели А671.57. Затем взамен комплекса А207.81, выпускавшегося серийно до 1982 г. на базе универсального измерительного микроскопа УИМ-21, был разработан электроискровой комплекс «Электроника 04ИВ-200» (рис. 160) модели А207.86 с тиратронным генератором импульсов А207.58. Он был предназначен для изготовления деталей электронных приборов с точностью до ± 3 мкм с максимальным полем обработки 200×125 мм.

Внедрение в промышленность партии (более 700 шт.) этих комплексов позволило не только повысить точность и качество изготавливаемых деталей (в 1,6 раза), но и существенно (в 1,7 раза) уменьшить занимаемую оборудованием площадь.

В конце 1980-х гг. на базе серийной модели А207.86 был создан макет комплекса «Элизен-1» с управлением по трем осям микропроцессорным устройством ЧПУ модели ЮЩ 2.559.008 (рис. 161) ПЗУ — 128К, ОЗУ — 256К с сохранением информации при отключении питания.



Рис. 161. Электроискровой комплекс «ЭЛИЗЕН-1» с микропроцессорным устройством ЮЦ 2.559.008



Рис. 162. Электроискровой комплекс 04IB-100 модели А207.90 для изготовления деталей ЭВП СВЧ электродом-проволокой \varnothing 6–15 мкм



Рис. 163. Комбинированный электроискровой комплекс ЭХ1970 с СЧПУ 15ИПЧ-3-001 для изготовления пролетных каналов малого диаметра многолучевых электронных СВЧ приборов (МЛП)

Отображение информации осуществлялось на цветном видеомониторе МС 6106 с графическим контроллером, двумя НМГД «Электроника МС 5305», которые были совместимы по формату записи с накопителями ПК (типа IBM PC) и защищенной алфавитно-цифровой клавиатурой. Предусмотрен вывод на экран до 50 страниц меню. Дискретность задания перемещения 1 мкм. Скорость перемещения — от 0 до 150 мм/мин. Привод для ШД5. Во время изготовления деталей осуществлялось параллельное редактирование и подготовка программ, изменение параметров генератора, натяжения и скорости перемотки проволоки (не останавливая процесса обработки). Предусмотрена возможность наращивания количества управляемых осей до пяти. Расчет и подготовка программ осуществлялась на персональных компьютерах с записью на ГМД. Использование блока генератора на транзисторных сборках обеспечивало производительность процесса в пределах 40–50 мм²/мин при $Ra = 1,5-2$ мкм. Обработка осуществлялась с погружением в ванну с водой из водопровода.

В связи с необходимостью освоения новых изделий на предприятиях отрасли были созданы прецизионные электроискровые вырезные комплексы «Электроника 04ИВ-140» (модель ЭХ1893), «Электроника 04ИВ-125» (модель ЭХ1925) и А207.90, обеспечивающие автоматическое изготовление миниатюрных деталей электронных СВЧ-приборов с точностью до 2 мкм электродом-проволокой диаметром от 0,01 до 0,05 мм.

На рис. 162 представлен комплекс А207.90 с СЧПУ 15ИПЧ-3-001 (1) и транзисторным генератором импульсов (2) для изготовления деталей электронных приборов электродом-проволокой диаметром от 6 до 15 мкм. Он оснащен малогабаритным транзисторным генератором, формирующим биполярные импульсы длительностью не более 0,5 мкс, обеспечивая обработку в чистой питьевой воде из водопровода без деионизации.

Ширина пазов, прорезаемых на комплексе, — 8–20 мкм, радиус в углах — от 4 до 10 мкм (в зависимости от диаметра электрода-проволоки и режимов обработки), отклонение ширины пазов от номинала не превышало 2 мкм, а точность их расположения по шагу — 3 мкм. Модель А207.90 до сих пор не имеет аналогов.

На рис. 163 показан электроискровой комплекс ЭХ 1970 с малогабаритным транзисторным генератором биполярных импульсов. Он предназначен для изготовления до 50 отверстий \varnothing 0,3–1,0 мм при соотношении $D/h \leq 100$ с перемычками между ними 50–70 мкм в деталях из сплава меди с молибденом на глубину до 20–25 мм — пролетных каналов в блоках многолучевых электронных СВЧ-приборов.

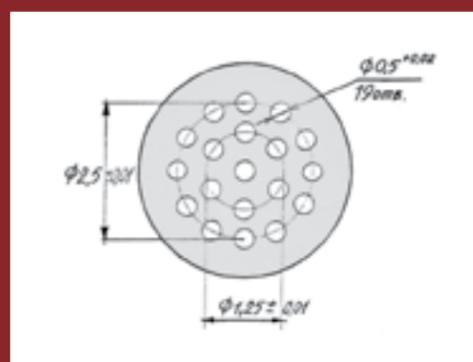


Рис. 166. Сечение 19 пролетных каналов МЛП СВЧ-приборов: L до 25 мм, \varnothing 0,5 мм

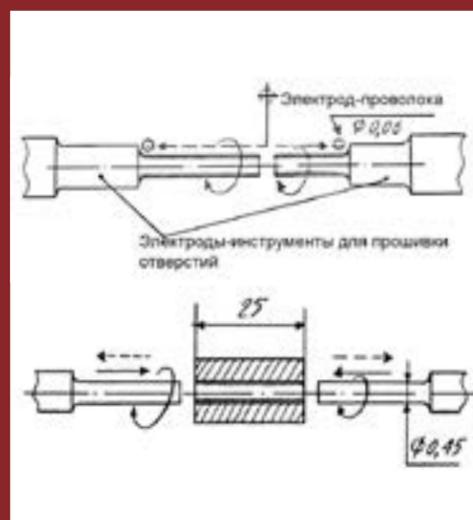


Рис. 167. Схемы обточки электродов и «прошивки» отверстий обточенными электродами 19-ти лучевого блока

изготовления, а также выбор вариантов процессов изготовления многолучевых приборов осуществлялось под руководством Евгения Алексеевича Котюргина (рис.165).

К сожалению, работы по применению новых методов электроискрового изготовления многолучевых приборов так и не были закончены в связи с начатой перестройкой народного хозяйства в стране и ликвидацией министерства электронной промышленности. А также ухода из жизни кадров высокой квалификации: Сергея Васильевича Королёва и других. Недавно это произошло с Евгением Алексеевичем Котюргиным, с которым мы сотрудничали более 40 лет. И здесь в связи с ликвидацией Советского Союза и министерства электронной промышленности эти работы не удалось завершить. А ведь ставилась задача последовательного перехода от 19-ти лучевых МЛП, с отверстиями диаметром $0,40^{+0,005}$ мм, к 125-ти лучевым МЛП с отверстиями диаметром не более $0,10^{+0,005}$ мм.

Осуществлялась последовательная электроискровая «прошивка» всех отверстий, вращающимися электродами соответствующего диаметра, обточенными на этой же установке электродом-проволокой. На рис. 166 показана такая схема изготовления 19-ти отверстий диаметром $0,5^{+0,02}$ мм в центре блока, и на диаметрах $1,25 \pm 0,01$ мм и $2,5 \pm 0,01$ мм. К сожалению, эти исследования были прекращены, и производству пришлось возвращаться к старой технологии сборно-паяных конструкций блоков МЛП.

Станочный модуль состоит из монолитной плиты, на которой размещены две продольные (x_1 и x_2) и одна поперечная (y) каретки. На поперечной каретке расположены: каретка (z) вертикального перемещения обрабатываемого изделия, механизм перемотки и натяжения электрода-проволоки, скоба для ее направления, а также устройства для ориентации обрабатываемой детали и ее крепления. На двух продоль-

Развитие радиотехнических средств вооружения, совершенствование радиолокационных систем (РЛС) сопровождалось непрерывным повышением требований к эксплуатационным параметрам ЭВП. Эти требования не могли быть обеспечены конструкцией однолучевых усилительных приборов О-типа, из-за высоких питающих напряжений и больших фокусирующих магнитных систем. А на основе приборов М-типа — из-за низкого коэффициента усиления. В США эта дилемма решалась в пользу ЛБВ, а специалисты НИИ-160 выбрали новое направление — многолучевые клистроны.

Определенную роль в развитии направления многолучевых приборов сыграли работы Сергея Васильевича Королёва (рис.164). Уже в 1968 году начали выпускаться первые мощные промышленные образцы многолучевого клистроны. Технологическое обеспечение



Рис. 164. С.В. Королёв



Рис. 165. Е.А. Котюргин



Рис. 168. Станочный модуль 04 ИВ-200 со встроенным генератором импульсов. Занимаемая площадь — 1,2 м²

Таблица 7. Основные технические характеристики станочного модуля 04ИВ-200

Максимальные габариты детали, мм	250 × 100 × 80
Перемещения, мм:	
по осям X-Y	125 × 200
по осям U-V	40 × 40
по оси Z	80
Погрешность перемещения по осям X-Y, мкм	± 4
Диаметр проволоки, мм	0,05–0,20
Расход проволоки, м/ч	40–70
Межэлектродная среда	Вода питьевая
Занимаемая площадь, м ²	1,2



Рис. 169. Электроискровой комплекс «Элиур 2-200» модели А207.92М со встроенным генератором импульсов и управлением по двум осям с СЧПУ на базе компьютера

ных каретках установлены механизмы вращения электродов-инструментов или заготовок. Они строго соосны. Изготовление электродов-инструментов для прошивки отверстий осуществляется электродом-проволокой $\varnothing 0,05-0,1$ мм.

На рис. 167 показаны схемы обработки электродов-инструментов и прошивки ими пролетных каналов с двух сторон на комплексе ЭХ1970. В качестве заготовок электродов-инструментов для прошивки пролетных каналов используются стержни квадратного сечения $0,5 \times 0,5$ мм длиной 30–40 мм (из твердого сплава ВКЗ, ВК6 или вольфрамомедной композиции) с припуском под обточку. Электроды-инструменты вырезаются электродом-проволокой из заготовки, закрепленной в поворотном приспособлении вырезного станка. Пазы прорезаются на глубину 30–40 мм сначала в одном направлении, а затем, после поворота заготовки на 90°, в перпендикулярном направлении. Получившиеся стержни квадратного сечения отрезают. Таким образом, из одного куска заготовки можно получить несколько десятков квадратных заготовок электродов с минимальными отходами материала.

После изготовления электродов заготовка блока, в котором будут прошиваться с двух сторон пролетные каналы, устанавливается в приспособлении, которое закрепляется на вертикальной каретке. Отверстия последовательно прошиваются вращающимися электродами с двух сторон одновременно. Скорость прошивки отверстий $\varnothing 0,5$ мм — 1,5–2,5 мм/мин.

Применение электроискрового изготовления пролетных каналов многолучевых приборов позволило существенно упростить применявшуюся технологию их изготовления.

Упростить этот процесс можно за счет одновременной прошивки всех пролетных каналов специальным электродом-инструментом, изготовленным электроискровым методом последовательного копирования (по технологии изготовления пуансонов для холодного выдавливания анодных блоков магнетронов). К сожалению, работы по освоению этой технологии изготовления многолучевых каналов диаметрами до 0,2–0,3 мм с их числом от нескольких десятков до 125 шт. были прекращены из-за отсутствия финансирования.

В начале 1970-х гг. был разработан типовой ряд электроискрового прецизионного оборудования и малогабаритные транзисторные генераторы импульсов, внедрение которых открыло возможности для двух-трехкратного повышения производительности процесса, улучшения качества изделий. Также был разработан и передан в серийное производство электроискровой вырезной станок А207.46 на базе станка А207.23 (базовой модели А208.96) с универсальным

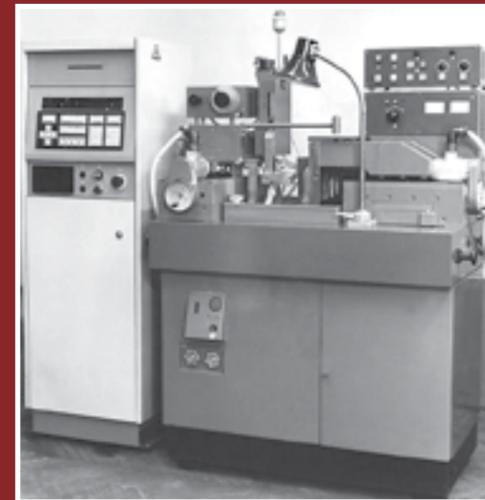


Рис. 170. Электроискровой комплекс «Элиур 5-200» модели А207.93М со встроенным генератором импульсов и управлением по 5 осям с СЧПУ модели УПУ СЭ-5/74-36 (на базе микро-ЭВМ)



Рис. 171. Электроискровой комплекс «Элиур 5-200» модели А207.93М со встроенным генератором импульсов и управлением по 5 осям с СЧПУ на базе компьютера

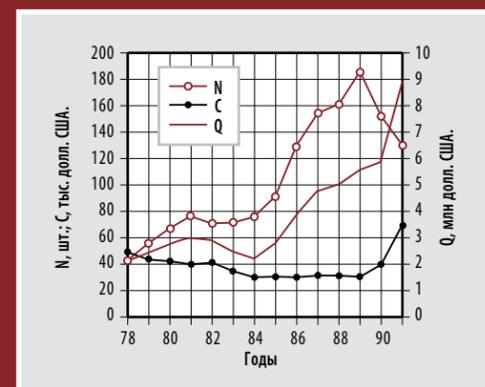


Рис. 172. Выпуск электроискровых станков (N, шт.), средняя стоимость (C, млн \$) и объемы производства (Q, млн \$)

пультом программного управления А745.17. Носитель информации — восьмидорожечная стандартная бумажная перфолента. Считывающее устройство — фотоэлектрическое. Привод координатного стола осуществлялся шаговыми двигателями ШДР-711 с дискретностью перемещения 0,5 мкм/шаг, а отсчет перемещений — фотоэлектрическими датчиками положения. При коротких замыканиях электрод-проволока отводился по пройденной траектории на необходимую величину и затем возвращался в исходную точку. Предусмотрено задание средней скорости следящей подачи с плавной регулировкой от 0,2 до 12 мм/мин. Выпущена партия таких станков.

Витебским заводом технологического оборудования начат серийный выпуск электроискровых станков 4 модели: А207.23, А207.33, А207.40, ЭХ1331. К концу 1970-х гг. было выпущено около 500 единиц данного оборудования.

Общее количество электроискрового оборудования, применявшегося только в электронной промышленности, превысило 1 000 единиц. На ряде предприятий отрасли были созданы специализированные электроискровые цеха, более 40 участков и 14 лабораторий. Электроискровым способом ежегодно изготавливалось не менее двух миллионов деталей 15 000 наименований.

На рис. 168 представлена базовая модель станочного модуля 04 ИВ-200 (табл. 7) со встроенным генератором импульсов для изготовления деталей электродом-проволокой с погружением в ванну с водопроводной водой. Он стал на многие годы основой для создания комплексов нового поколения: А207.92, А207.93 и др. Точность позиционирования ± 4 мкм по всей длине перемещений обеспечивалась оригинальной конструкцией исполнительных механизмов (безлюфтовой парой винт — гайка и призматическими направляющими качения с крестообразно расположенными роликами).

Электроискровые комплексы «Элиур-200» со встроенными генераторами импульсов представлены: на рис. 169 — модель А207.92 М с СЧПУ на базе компьютера с управлением по двум осям, на рис. 170 — А207.93 М с СЧПУ модели УПУ СЭ-5/74-36 на базе микро-ЭВМ и на рис. 171 — А207.93 М с СЧПУ на базе компьютера (с управлением по пяти осям). Скорость формообразования деталей в водопроводной воде при $R_a \leq 1,25$ мкм — 60 мм²/мин (по меди) и 40 мм²/мин (по стали).

На комплексах можно изготавливать детали сложных профилей с вертикальными и наклонными образующими. С переменными углами наклонов, различными контурами в верхней и нижней плоскостях. Обеспечивается графический динамический контроль конту-



Рис. 173. Электроискровой комплекс «Элиур 90» (ЭХ 2214) с автоматической заправкой электрода-проволоки и управлением по 5 осям.

Таблица 8. Основные технические характеристики станочного модуля 04 ИВ-400 «Элиур-90»

Габариты детали, мм	600 × 320 × 160
Перемещения, мм: по осям X-Y по осям U-V по оси Z	400 × 250 60 × 60 160
Погрешность перемещения по осям X-Y (без коррекции), мкм	± 5
Проволока: диаметр, мм расход, м/час	0,1–0,3 200

ров детали с визуализацией процесса обработки, просмотр и редактирование управляющих программ во время обработки.

На рис. 172 показана динамика выпуска в ГНПП «Исток» электроискровых станков и комплексов с 1978 по 1991 г., изменение их средней стоимости и объемов производства. Из графика видно, что выпуск электроискровых станков-комплексов цехом НПК СТМ ГНПП «Исток» с 1978 по 1989 г. непрерывно увеличивался — с 43 до 183 шт. в год (с 2,1 до 5,5 млн долларов в год). К концу 1980-х гг. НПК-СТМ НИИ «Исток» выпустил более 2000 единиц электроискрового оборудования. Оно было внедрено на сотнях предприятий десятков городов России, Украины, Беларуси, Литвы, Латвии, Эстонии, Кыргызстана и др.

Однако с 1989 г. количество выпускаемых электроискровых комплексов стало снижаться (примерно на 20 % ежегодно) — в стране началось резкое торможение развития предприятий военно-промышленного комплекса.

Следует отметить, что изготовление инструмента (например, вырубных штампов с периметром до 0,5 м) на электроискровых комплексах пятого поколения, созданных в электронной промышленности (А207.78, А207.79 А207.81, А207.86, А207.92, А207.93 и др.):

- ♦ обеспечивало полную автоматизацию процесса изготовления деталей;
- ♦ исключало применение ручного труда;
- ♦ в 5 раз уменьшало длительность цикла обработки;
- ♦ в 20 раз уменьшало занятость рабочих;
- ♦ в 23 раза сокращало объем механических работ.

ЭИ комплексы А207.79, А207.92 и А207.93, созданные НПО «Исток», по сравнению с зарубежными аналогами имели:

- ♦ на порядок меньшую стоимость;
- ♦ на порядок меньшую занимаемую площадь (от 1,1 до 2,5 м²);
- ♦ в 5–6 раз меньший расход электрода-проволоки и электрической энергии (не более 2 м/мин и 3 кВА);
- ♦ в 2,5 раза меньшую потребляемую мощность;
- ♦ наименьшие эксплуатационные расходы за счет использования обычной воды из водопровода, не требующей деионизации и поддержания ее проводимости в заданных пределах;
- ♦ шероховатость обработанной поверхности Ra не более 1,5–2,5 мкм на режимах, обеспечивающих скорость формообразования в пределах 40–80 мм²/мин.

НПО «ИСТОК», являясь производителем первых в мире электроискровых вырезных прецизионных станков, производило их более 50 лет. Приоритет предприятия в этой области закреплен многочисленными публикациями ведущих специалистов, присуждением в 1963 г. Ленинской премии, авторскими свидетельствами на изобретения, а также патентами и свидетельствами о регистрации выполненных работ.

Однако приходится констатировать, что по целому ряду причин (негативное отношение к новому способу некоторых влиятельных специалистов и чиновников, практическая невозможность патентования изобретений за границей), а также из-за стремления как-то закрепить приоритет и обезопасить сделанное от плагиата, авторы разработок в основном ограничивались публикацией полученных результатов в открытой печати. Это стало возможным благодаря издательству АН СССР, выпустившему «Труды ЦНИЛ-Электром АН СССР», и, главным образом, журналу «Электронная обработка ма-

териалов» АН МССР, который был основан в 1965 г. академиком Б.Р. Лазаренко, изобретателем электроискрового способа обработки материалов.

Однако, с другой стороны, создавшаяся ситуация только стимулировала проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, результатом чего стало создание сотен конструкций разнообразного уникального электроискрового оборудования.

Одной из последних НИР, выполненных в НПО «Исток» совместно с рядом предприятий МЭП СССР, было создание электроискрового комплекса «Элиур-90» (табл. 8.) с автоматической заправкой электрода-проволоки, управлением по 5 осям, использованием в качестве межэлектродной среды деионизированной воды со стабилизацией температуры (рис. 173).

Генератор импульсов с блоками коммутаторов на мощных полевых транзисторах (расположенный сзади станочного модуля) обеспечивал широкий диапазон режимов и скорость формообразования деталей не менее 60 мм²/мин при Ra не более 2,5 мкм (до очистки стеклянными шариками). Устройство для сбора отработанной проволоки и гидроагрегат находились слева и сзади. Пятикоординатный комплекс «Элиур-90» с автоматической заправкой электрода-проволоки был предназначен преимущественно для изготовления разнообразных инструментов (деталей вырубных штампов и пресс-форм, дюз для экструзии металлов, пластмасс и других материалов, фасонных резцов, шаблонов и др.) с вертикальными и наклонными образующими профилями.

В середине 1970-х гг. началось интенсивное производство и разработка электроискровых станков для изготовления деталей электродом-проволокой (wire-cut electric discharge machine) японскими фирмами: JAPAX, FANUC, MITSUBISHI, SODICK, HITACHI и др.

Так, Fanuc в 1980 г. уже производила не менее 100 электроискровых вырезных станков в год с четырехкоординатными системами CNC на высокоавтоматизированном заводе прецизионных машин. Однако первыми на рынок СССР по ряду причин попали электроискровые станки швейцарских фирм. До начала 1980-х гг. швейцарская фирма AGIE оставалась фактическим монополистом.

В 1979–1980 г. японская торговая фирма Kokusai Koeiki продала через В/О «Станкоимпорт» первые электроискровые установки фирмы JAPAX. К 1984–1985 г. она вышла на первое место по объемам продаж в СССР (по 50 электроискровых установок в год). К этому времени относится существенное снижение цен на швейцарское электроискровое оборудование. Всего в СССР было поставлено

более 200 единиц электроискрового оборудования JAPAX.

Но в 1986–1987 гг. были введены жесткие ограничения на экспорт передовых технологий из Японии в СССР. Эти запреты создали «тепличные» условия для бесконкурентной поставки оборудования известных европейских фирм, вынуждая предприятия переплачивать за не самое лучшее электроискровое оборудование.

12. Распространение опыта проектирования электроискровых установок в стране

Многие предприятия различных отраслей промышленности, находившиеся во многих городах Союза — Бердянске, Воронеже, Ленинграде, Комсомольске на Амуре, Куйбышеве, Новосибирске, Омске, Харькове и др., — не располагая возможностью централизованного получения электроискрового оборудования, вынуждены были проектировать и изготавливать это оборудование своими силами.

Из всех промышленных электроискровых установок, выпускаемых в Советском Союзе в те годы, наибольшего внимания заслуживают установки Ленинградского карбюраторного завода им. В.В. Куйбышева, который по сути дела в течение многих лет был основным поставщиком электроискрового оборудования для отечественной промышленности и некоторых зарубежных стран. Этим мы обязаны талантливому инженеру Левинсону Евгению Максимовичу, который внес неоценимый вклад в развитие электроискрового способа обработки металлов.

Из многочисленных технологий электроискровой обработки заслуживает особого внимания процесс изготовления отверстий в деталях топливной аппаратуры, полностью



Рис. 174. Распылитель насос-форсунки

вытеснивший в Советском Союзе из производства операцию механического сверления отверстий. Опытным путем установлено, что процесс изготовления отверстий диаметром 0,35 мм в сталях является граничным, когда производительность электроискровой и механической обработки металла, поддающегося резанию, приблизительно одинакова. А по мере уменьшения диаметра отверстий трудности их сверления резко возрастают, в то время как производительность электроискровой обработки держится почти на одном



Рис. 175. Сверление отверстий $\varnothing 0,15$ мм в распылителях для насос-форсунок на быстроходном сверлильном станке с пневматическим приводом

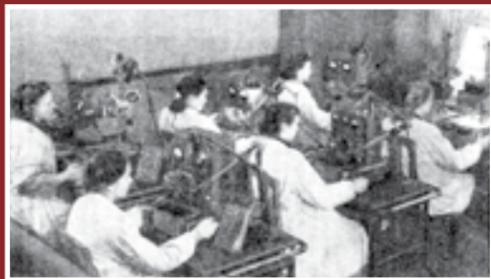


Рис. 176. Участок цеха Ленинградского карбюраторного завода, где электроискровым способом изготавливались отверстия в распылителях топлива



Рис. 177. Электроискровая узкоспециализированная установка ЛКЗ-34, предназначенная для обработки деталей большими сериями (одного типоразмера)

уровне (даже при применении *RC*-генератора и керосина в качестве межэлектродной среды). Одним из первых применений электроискровой технологии в основном производстве был предпринятый в 1948 г. переход на электроискровую обработку отверстий $\varnothing 0,15$ мм в деталях дизельной топливной аппаратуры. Объектом обработки являлся распылитель из сравнительно твердой стали 50ХФА, в носике которого требовалось просверлить 6 отверстий $\varnothing 0,15 + 0,01$ мм (рис. 174).

Начатое в 1947 г. производство отечественных насос-форсунок и принятая при организации их производства американская технология сверления отверстий на специальных станках (рис. 175) с горизонтальным расположением шпинделя при скорости его вращения до 60 000 об/мин не удовлетворяли темпам роста их выпуска.

На рис. 176 показан участок цеха Ленинградского карбюраторного завода, где в деталях топливной аппаратуры (в распылителях топлива) электроискровым способом изготавливались отверстия $\varnothing 0,15 + 0,01$ мм, площадь сечения которых значительно меньше 1 мм^2 .

На рис. 177 представлена электроискровая узкоспециализированная установка ЛКЗ-34, предназначенная для обработки деталей массового выпуска (одного типоразмера). На ней обрабатывались распылители дизельных насос-форсунок, в которых одновременно выполнялось 6 отверстий $\varnothing 0,15 + 0,01$ мм. Производительность обработки распылителей с 6 отверстиями в каждом — 900 шт. за 8 часов.

Завершающим этапом автоматизации электроискровой обработки сопловых отвер-

стий в распылителях на ЛКЗ является создание автомата, не требующего участия оператора в процессе обработки (рис. 178). На нем распылители 7 засыпаются в бункер 30 с вращающимся диском 29. Засыпка бункера производится на 8–10 часов непрерывной работы автомата. Один работник мог обслуживать большой парк таких автоматов. С момента перехода от механического сверления к электроискровой обработке производительность выросла в 300 раз!

Ленинградский карбюраторный завод им. Куйбышева уже к 1949 г. выпустил более 1000 электроискровых установок 48 моделей и модификаций. Среди них не только установки для обработки деталей массового выпуска — распылителей дизельных насос-форсунок для впрыска топлива, в которых изготавливаются отверстия $\varnothing 0,15 + 0,01$ мм. Кроме того, установки для инструментальных производств:

- ♦ ЛКЗ-57 для изготовления мелких вырубных штампов и профильных фильер из твердых сплавов и сталей (рис. 179);
- ♦ ЛКЗ-49 для прорезания узких щелей латунной или медной лентой в деталях из твердых сплавов, стали и цветных металлов (рис. 180);
- ♦ ЛКЗ-55 для разрезания тонким вращающимся диском твердосплавных пластинок, прорезания щелей в цангах и втулках (рис. 181);
- ♦ для электроискровой заточки инструмента и шлифования деталей из различных материалов;
- ♦ для изготовления полостей крупных кузнечных штампов и др.

Многие электроискровые установки, созданные впоследствии за рубежом, были сделаны по типу конструкций завода ЛЕНКАРЗ.

Уже в 1951 г. издательством «Машгиз» была издана монография «Электроискровые установки» Е.М. Левинсона и Е.И. Владимиров. Значительный вклад в развитие электроискровых технологий, в автоматизацию процессов внес и Б.Г. Гуткин (Ленинградский филиал ВПТИ МТрМ). Он создал ряд полуавтоматических установок для выполнения в распылителях отверстий $\varnothing 0,15-0,3$ мм с точностью от 0,006 до 0,02 мм, а также для шлифования их рабочего конуса и изготовления сеток с круглыми отверстиями малого диаметра (рис. 182).

Его опыт был описан в монографии «Автоматизация электроискровых и анодно-механических станков», издательство «Машгиз», 1952 г., в статье «Электроискровые полуавтоматы для обработки отверстий малого диаметра» в кн.: «Новые методы электрической обработки металлов», М.— Л., 1955 г.



Рис. 180. Установка ЛКЗ-49 для прорезания узких щелей латунной или медной лентой

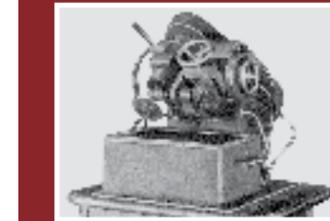


Рис. 181. Установка ЛКЗ-55 для разрезания тонким вращающимся диском

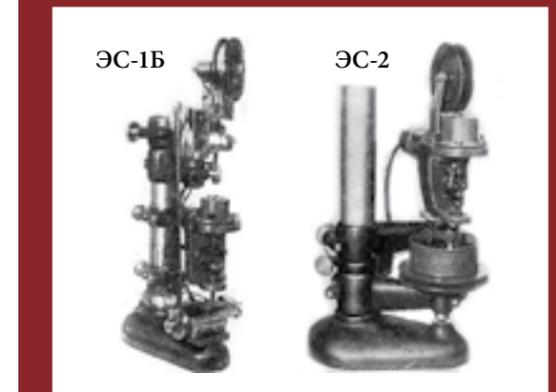


Рис. 182. Установки для изготовления сеток с круглыми отверстиями малого диаметра ЭС-1Б и ЭС-2

Опыт конструирования электроискрового оборудования и применения электроискровых технологий, накопленный Е.М. Левинсоном и Б.Г. Гуткиным, использовался и нами в начале 1950-х гг. при создании первых образцов электроискрового прецизионного оборудования для изготовления деталей электронных приборов СВЧ.

16 мая 1956 г. «Промышленно-экономическая газета» в № 46 писала о том, что на харьковском тракторном заводе имени Серго Орджоникидзе специалисты электроискровой лаборатории и отдела главного технолога сконструировали и изготовили 8-шпиндельный электроискровой станок для шлифовки корпуса распылителя топливного насоса трактора ДТ-54.

На нем обрабатывалось одновременно 8 деталей. Производительность станка — до 1000 деталей в смену. Станок обслуживался одним рабочим. На снимке (рис. 183) инженер В. Половнев осматривает детали, обработанные работницей Л. Наторовой

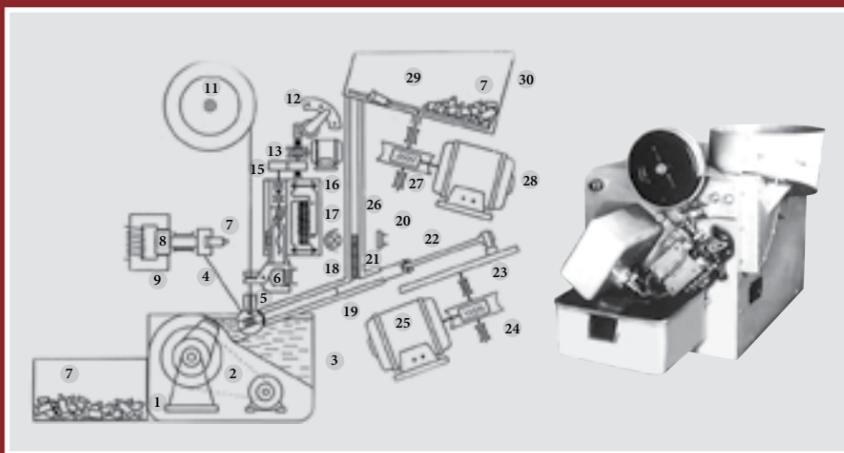


Рис. 178. Автомат для электроискровой обработки отверстий $\varnothing 0,15$ мм (сверху)



Рис. 179. Установка ЛКЗ-57 для изготовления мелких штампов, профильных фильер и волок (справа)

ЛКЗ-57



Рис. 183. 8-шпиндельный электроискровой станок для шлифовки корпуса распылителя топливного насоса трактора ДТ-54

на электроискровом станке. Со временем электроискровые установки стали применяться как для обработки деталей, размеры которых измерялись микронами, так и крупных изделий, вес которых достигал нескольких тонн.

К началу 1960-х гг. большое распространение получило электроискровое оборудование для изготовления деталей электродом-проволокой. При производстве крупных партий деталей большой экономической эффект получали при применении копировальных электроискровых установок, на которых формообразование изделий осуществлялось электродом-проволокой способом копирования профиля маломощными искровыми разрядами.

В середине 1960-х годов на электроискровом участке киевского завода «Генератор» ПО «Октава» было организовано серийное изготовление замедляющих систем ЛОВ сантиметрового диапазона длин волн. Среди них «Засечка», «Зеница», «Зона», «Галактика», «Гомель», «Зеркало», ОВС-1, ОВС-9, ОВ-12, ОВ-14. Они производились на установках со встроенными тиратронными генераторами и импульсными трансформаторами, обеспечивающими использование в качестве межэлектродной среды воды (в начале дистиллированной, а затем непосредственно из водопровода).



Рис. 184. Семинар в Доме научно-технической информации им. Ф. Э. Дзержинского, 1957 г.



Рис. 185. Совещание по электроискровой обработке металлов в Доме оборонной техники, 1958 г.



Рис. 186. Совещание в ЦНИЛ-Электром,



Рис. 187. Ознакомление участников совещания с электроискровой технологией в ЦНИЛ-Электром, 1958 г.



Рис. 179. Электроискровая координатная установка на базе А207.23 с тиратронным генератором импульсов и СЧПУ на выставке электронной техники в Москве



Рис. 188. Космонавт А. Н. Николаев знакомится с электроискровыми технологиями в НИИ-160

Подобные участки на предприятиях электронной промышленности Советского Союза были в Полтаве на заводе «Знамя», Ростове-на-Дону — на заводе «Гранит», Саратове — на заводе «Контакт». Они создавались с целью организации серийного производства электронных приборов СВЧ, разрабатываемых головной организацией предприятий — НИИ-160. Число единиц оборудования на каждом участке достигало нескольких десятков.

В конце 1950-х и в 1960-е гг. в стране активно проводились семинары и совещания по электрическим методам обработки материалов (рис. 184–188).



Рис. 189. Первый международный симпозиум по электроискровой обработке металлов. Прага, сентябрь 1960 г., ЧССР

13. Развитие электроискровой технологии за рубежом в первое десятилетие после открытия способа

Подводя итоги первого международного симпозиума по электроискровой обработке металлов, организованного научно-техническим обществом ЧССР 12–20 сентября 1960 г. в Праге, Б.Р. Лазаренко отметил, что СССР идет, несомненно, впереди в области создания конструкций электроискровых установок, показатели которых превосходят зарубежный уровень. В симпозиуме участвовали ведущие специалисты в области электроискровой обработки металлов из 11 стран мира (рис. 189). Для примера он называл электроискровую установку ЭЛЕКТРОМ-15, созданную ЦНИЛ-Электром АН СССР, а также целую группу электроискровых прецизионных установок, созданных ГС НИИ ГК СМ СССР по электронной технике.

Участникам симпозиума была продемонстрирована оригинальная электроискровая установка чехословацкого Института автоматизации и механизации (ВУМА) BQD-4, предназначенная для одновременной обработки 30 ручьев прокатного вала диаметром до 350 мм и длиной до 1700 мм (рис. 190). Через 8 часов работы установки в автоматическом режиме прокатный вал был готов. Установка имела трехконтурную схему, в качестве межэлектродной среды использо-

валась обычная промышленная вода. Эксплуатация данного оборудования была безопасной. Берлинский завод «Герман Шлимме» представил аналогичную установку для электроискровой обработки ручьев прокатного вала (рис. 191).

Общество промышленной электроники (AGIE) познакомило участников симпозиума с новой моделью электроискровой установки SIP-AGIE для прецизионных работ (рис. 192). В ней удачно сочетались достижения электроники с оптическими измерительными приборами. На базе столов оптических координатных машин фирмы SIP создана автоматическая установка SIP-AGIE, обладающая такими техническими характеристиками:

- ♦ максимальная площадь обрабатываемой заготовки 400 × 250 мм;
- ♦ гарантируемая точность перемещений 2 мкм;
- ♦ автоматически регулируемая подача шпинделя на расстоянии 150 мм;
- ♦ мощность установки 1,7 кВА;
- ♦ максимальная производительность 300 мм²/мин;
- ♦ чистота поверхности по твердому сплаву — 10-й класс.

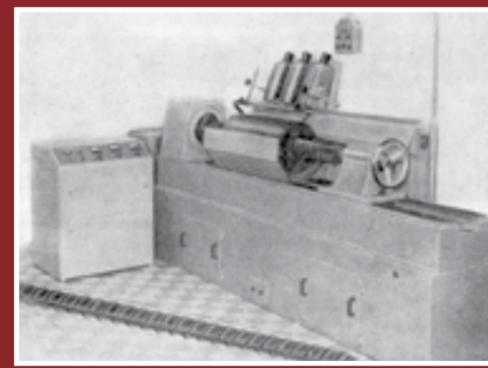


Рис. 190. Установка BQD-4 для электроискровой обработки ручьев прокатного вала. Мощность установки 5 кВА

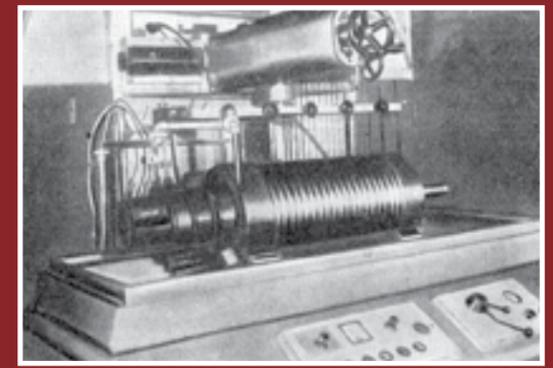


Рис. 191. Установка для электроискровой обработки ручьев прокатного вала производства завода им. Германа Шлимме

Эта же фирма демонстрировала еще две электроискровые установки: универсальную ВЛ-6 для выполнения электроискровых работ и БКУ-12 для обработки больших заготовок, главным образом ковочных штампов. Швейцарская фирма Charmilles демонстрировала электроискровую установку «Элерода Д-15» для выполнения тяжелых работ мощностью 30 кВА, максимальной площадью обрабатываемой заготовки до 1080 × 470 мм и максимальной производительностью до 4000 мм²/мин.

Японская фирма IKEGAI разработала и выпустила электрические установки Д-5 для изготовления отверстий диаметром 0,5–150 мм и глубиной 10–100 мм. Максимальный ход шпинделя — 500 мм, скорость обработки стали — 1,5 г/мин. Более мощная установка S-12 была предназначена для изготовления штампов, в том числе карбидных.

Электрическая фотография — принципиально новое применение искрового электрического разряда в электротехнике.

Английская фирма «Ронео» выпустила электронную фотограверную машину для изготовления электроискровым способом трафаретов, используемых для типографского воспроизведения полутонных оригиналов (рис. 193).

Для получения типографского трафарета электроискровым способом оригинал и трафаретный лист с токопроводящим покрытием закрепляют на двух барабанах, помещенных на одной оси. Считку оригинала осуществляют при помощи фотоумножителя, смонтированного в подвижной каретке, на которой установлен искровой воспроизводящий механизм, создающий трафаретную сетку. Чтобы трафарет точно передал на бумаге тональность копируемого изображения, количество отверстий постоянного размера, выполняемых электроискровым воспроизводящим механизмом в трафаретном листе в единицу времени, должно быть пропорцио-

нально коэффициенту плотности тока копируемого изображения.

Откорректированные и преобразованные колебания фототока подавали на кольцевой модулятор, где их накладывали на несущую частоту (20 кГц), модулировали по амплитуде, усиливали и подавали на электрод искропроизводящего механизма. Таким образом, количество отверстий, изготавливаемых в трафарете, колеблется от одного отверстия в секунду для белого поля и до 12000 отверстий в секунду для сплошной черной поверхности оригинала, где трафарет должен пропускать максимум краски. Характеристики установки: скорость вращения барабанов — 200 об/мин; скорость перемещения каретки — 64 мм/мин; время развертки оригинала шириной 20 см — 20 мин. Линеатура раstra 200 строк/см. Преимущества электроискрового способа воспроизведения полутонных оригиналов перед ручным или фотохимическим:

- ♦ трафарет изготавливался непосредственно с оригинала, без промежуточного фотокопирования;
- ♦ время изготовления трафаретов значительно меньше;
- ♦ качество репродукций столь высоко, что они часто не хуже оригинала;
- ♦ стоимость изготовления трафаретов не зависела от сложности рисунка.

Электроискровая фотогравировальная машина «Стенофакс» фирмы «Таймс факсимиле Корпорейшн» предназначена для изготовления трафаретов, используемых при воспроизведении полутонных оригиналов (рис. 194). По своим конструктивным данным эта машина была несколько проще, чем установка фирмы «Ронео»: она имела линеатуру раstra 55 линий/см. Трафареты, изготовленные машиной «Стенофакс», обеспечивали достаточно хорошее воспроизведение контрастных полутонных иллюстраций.

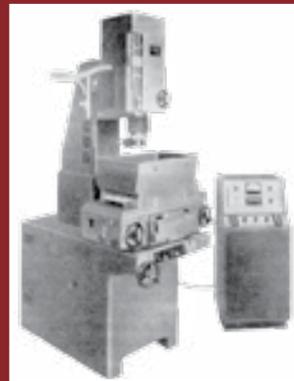


Рис. 192. Электроискровая установка SIP-AGIE для прецизионных работ



Рис. 193. Электроискровая фотограверная установка «Ронео»



Рис. 194. Внешний вид электроискровой фотогравировальной машины «Стенофакс»

Время изготовления одного трафарета не превышало 6 мин. Вспомогательное время (время на установку нового оригинала, нового шаблонового листа и снятие готового трафарета) в сумме не превышало 1 мин. Трафареты изготавливали из листов специальной виниловой пластмассы, покрытой токопроводящим порошком. Каждый такой трафарет при работе на стандартном оборудовании допускал изготовление 1000 высококачественных оттисков. В случае, когда нужен был только один оттиск воспроизводимого оригинала, вместо пластмассового листа использовалась специальная бумага, и в течение 3 мин получали высококачественную копию оригинала.

Быстрое распространение за рубежом электроискровой обработки металлов объясняется тем, что в этой области работает много специалистов самого различного профиля, а также тем, что ряд фирм разрабатывают и серийно выпускают большое количество электроискровых установок. Для научной разработки этого способа создаются специальные институты (например, Японский институт исследования способов обработки металлов электрическими разрядами) и организуются специальные фирмы, разрабатывающие и серийно выпускающие электроискровые установки.

Материал, изложенный в настоящем разделе, является далеко не полным, он лишь частично характеризует состояние развития электроискровой обработки материалов за рубежом в первое десятилетие после открытия способа. Даже из приведенных фактов очевидно, что электроискровая обработка металлов как новая технология начала формироваться в самостоятельную, очень крупную, новейшую область электротехники еще в начале 60-х гг. прошлого столетия.

Инженер фирмы «Викман» Эдкок в журнале *The Machining* в июле 1955 г. писал:

«Среди тех, кто работает над дальнейшим совершенствованием электроискрового способа обработки металлов, широко распространено мнение об огромных возможностях этого процесса. Электроискровой способ открывает путь для более гибкого и необычного подхода к конструированию деталей машин и инструмента, что устраняет серьезные производственные трудности, встречающиеся и в настоящее время. При помощи этого способа можно достичь более высокой скорости съема металла по сравнению с другими, даже самыми совершенными».

В публикации, посвященной первому международному симпозиуму по электроискровой обработке металлов, Б.Р. Лазаренко писал: «В истории развития электроискрового способа обработки металлов существует несколько характерных периодов: поиски первооткрывателей электроискрового способа, включение в эту область науки новых исследователей, проникновение способа в самые разнообразные отрасли промышленности и, наконец, всеобщее признание этого процесса как новой области электрофизики, имеющей большое теоретическое и практическое значение».

На симпозиуме в Праге прозвучало 15 докладов. По результатам их обсуждения представителю СССР Б.Р. Лазаренко и представителю английской авиационной компании Ф.Гриффитсу были вручены памятные медали Чешского политехнического института за достигнутые успехи в области развития технических наук.

Большинство работ, анонсированных на симпозиуме, посвящались физическим основам процесса электроискровой обработки металлов, но они не являлись оригинальными в отношении объяснения процесса и известных положений теории (в том числе установленных работами изобретателей способа).

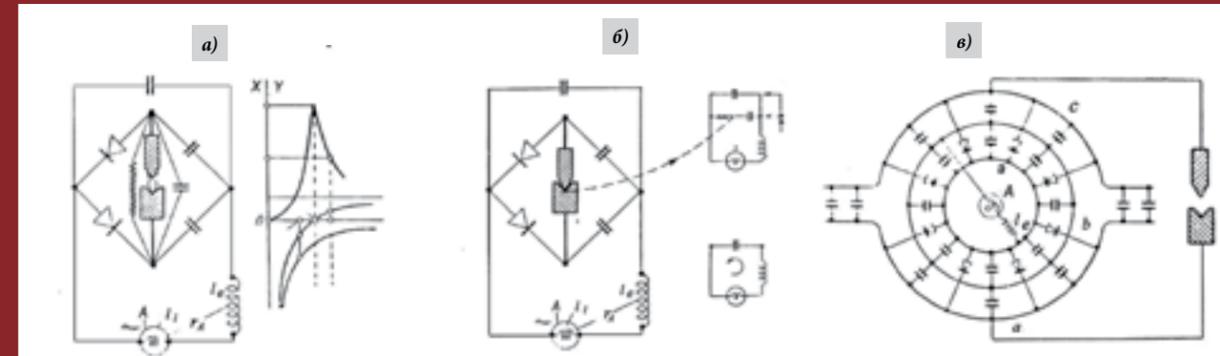


Рис. 195. Генератор электрических импульсов, разработанный Национальным центром научных исследований (Франция): а — состояние системы во время нормальной работы; б — то же в момент короткого замыкания; в — конструктивное расположение элементов схемы

Наиболее интересным на тот момент исследованием в этой области являлась работа, выполненная Институтом технической физики АН ЧССР. В.Ермох справедливо отметил, что период создания новых конструкций установок и технологии будет основан на данных, полученных физиками. Он также указал на ряд недостатков в физических исследованиях и обратил внимание участников симпозиума на необходимость создания более строгих и универсальных физических методов. Работа симпозиума показала, что самые большие успехи в изучении физики процесса электроискровой обработки металлов принадлежат физикам Советского Союза.

Представитель французского Национального центра научных исследований профессор М.С. Брума обобщил основные физико-технические требования, которые должны быть предъявлены к генераторам, питающим искровой промежуток. Он рассмотрел два вопроса.

1. Какой величины напряжение наиболее разумно применять для осуществления электроискровой обработки? Очевидно, чем выше напряжение, тем ниже точность обработки. При прочих равных условиях с повышением напряжения качество поверхности ухудшается и значительно увеличивается относительный износ обрабатываемого электрода.

2. Как зависит количество выбрасываемого материала от длительности и мощности единичного импульса, а также от частоты следования импульсов? Увеличение мощности и частоты следования разрядов увеличивает эрозию анода, а увеличение длительности импульса ее уменьшает. Следовательно, для увеличения производительности электроискровой обработки необходимо одновременно оперировать частотой и продолжительностью импульсов, напряжением и мгновенным значением тока. М.С. Брума решил эту задачу созданием схемы

электрического моста (рис. 195, а), одна из диагоналей которого образует цепь «обрабатывающий электрод — заготовка», а другая своими конечными точками подключена к генератору, дающему напряжение значительно меньше 100 В при токе в несколько ампер и переменной частоте 3–12 кГц. Изменение переменного тока низкого напряжения в мощные полярные импульсы высокой частоты осуществляется с помощью кремниевых диодов.

Работа этого генератора основана на динамическом равновесии моста: в ходе разрядов суммарная реактивность равна нулю, и источник дает максимальный ток; при контакте электродов (рис. 195, б) равновесие моста нарушается и влечет за собой возникновение реактанса, который автоматически ограничивает силу тока, подводимого источником питания. Вся схема была конструктивно выполнена в виде концентрических цилиндров (рис. 195, в).

На английской фирме «Спаркэлектрон» был построен генератор с частотой вращения 400 Гц, который использовал схему на кремниевых выпрямителях, для подачи на электроды, электрических униполярных импульсов длительностью $9 \cdot 10^{-4}$ с, при напряжении 22 В и среднем (регулируемом) токе до 150 А.

Участники симпозиума познакомились с работой наиболее совершенных электроискровых установок на комбинате твердых сплавов (г. Шумперк), в цеху, полностью оснащенном электроискровыми установками, разработанными Институтом автоматизации и механизации (ВУМА). Затем они посетили в г. Брно вторую международную ярмарку, где ряд фирм демонстрировали свои достижения в области электроискровой обработки. Тогда в Брно были представлены электроискровые установки, разработанные в ЧССР, Польше, Китайской Народной Республике, Англии и Швейцарии.

14. История возникновения и развития НИИ-160

В 1933 г. на базе известной с XIX века небольшой шелкоткацкой фабрики Капцовых (рис. 196) в деревне Фрязино Щелковского района Московской области по решению Совета Труда и Оборона СССР было начато строительство завода «Радиолампа».

Уже в 1934 г. завод выпустил первую продукцию: приемно-усилительные и генераторные лампы, необходимые для радиоприемников и радиовещательных станций. Быстро развивалась материально-техническая база завода, разрабатывалось и вводилось новое технологичное оборудование, обучались рабочие.

В предвоенные годы в Красной Армии преимущественно применялась проводная связь, а для радио, к сожалению, отводилась вспомогательная роль. Однако проводная связь в условиях войны была уязвимой и не вполне надежной, чтобы предохранить от возможных обрывов, значительную часть проводов нужно было закапывать в землю. Учитывая массовое применение различных технических средств, управление войсками с помощью проводной связи было осложнено. Основываясь на опыте Запада, и особенно Германии, в нашей армии



Рис. 196. Фабрика Капцовых. Здесь размещалось первое здание завода «Радиолампа», 1933 г.

было принято решение о радиофикации — применении в войсках портативной радиоаппаратуры. Особенно необходима была радиосвязь наземного командования с авиацией.

К началу Великой Отечественной войны на заводе во Фрязино были созданы все предпосылки для реализации задуманного еще

в 1934 г. проекта строительства «Большой радиолампы» — научно-исследовательского института и завода при нем. Но война помешала осуществлению этих планов. По решению правительства завод был эвакуирован в Ташкент.

Уже в конце июня вокруг Москвы появились опытные зенитные батареи для отражения налетов немецких бомбардировщиков, использующие радиолокационные станции. Одна из них находилась недалеко от железнодорожной станции Салтыковская (Дачная). Рядом с домами жителей были вырыты крытые траншеи-убежища, которые использовались для укрытия во время налетов. Нам, подросткам, удавалось наблюдать, как в пересечения лучей прожекторов попадали фашистские бомбардировщики, которые немедленно сбивались зенитными батареями, и как с характерным воем самолеты летели горящими на землю. При обстрелах по железной крыше дома стучали осколки снарядов, которые мы потом собирали.

Необходимость координации действий зенитных батарей и потребовала создания новых средств радиолокации. Идея организации Совета по радиолокации возникла благодаря ее успешному применению при обороне Москвы в начале Великой Отечественной войны. В частности, в связи с успешным действием опытной зенитной батареи по отражению налетов немецких бомбардировщиков.

В книге «Министр невероятной промышленности СССР» (Москва, 1999 г.) директор конструкторского бюро полупроводникового машиностроения А.А.Шокин, сын министра электронной промышленности А.И.Шокина, пишет: «Через Г.М.Маленкова на имя И.В.Сталина был подан соответствующий доклад с проектом постановления. Сталин принял А.И.Берга, который и изложил суть радиолокации, доказал необходимость развертывания широкого производства радиолокационных станций, рассказал о проблемах, которые этому препятствуют, и представил перечень шагов, которые необходимо предпринять государству. Говорить он умел, и по полупрозрачным сведениям беседа продолжалась три часа, закончившись одобрением».

В книге, посвященной 65-летию ФГУП «Исток», «От НИИ-160 до НПП «Исток», Часть I. Так начинался «Исток». 1941–1951 гг.» сотрудник информационного отдела института Р.М.Попов писал: «Этой же версии придерживается и Г.Б.Реутов — крупный ученый и конструктор в области радиолокации, средств информатики, методов обработки радиосигналов, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, генерал-майор, который в 1965 году за разработку радиолокатора для системы ПРО С-225 стал лауреатом Государственной премии СССР».

Когда угроза для северо-востока Московской области миновала, на Фрязинской площадке было решено восстановить завод. Из Новосибирска начало поступать оборудование, вывезенное туда из Ленинградского объединения электронного приборостроения «Светлана». Затем во Фрязино были направлены специалисты-светлановцы.

В соответствии с Постановлением Государственного Комитета обороны от 4 июля 1943 г. распоряжением СНК СССР от 13 сентября 1943 г. на базе Фрязинской «Радиолампы» был организован НИИ-160 с опытным заводом (известный позже как ГНПП «Исток»).

Основной целью нового предприятия была разработка и выпуск электронных приборов для радиолокационной техники. Началось становление отечественной СВЧ электронной отрасли, развитие которой возглавил вновь созданный институт.

На фронт из Фрязино стали поставляться приемно-усилительные лампы, генераторные лампы и ртутные выпрямители. В то время эти приборы использовались в танковых и авиационных частях. Развитие радиотехнических средств и совершенствование РЛС сопровождалось непрерывным повышением требований к эксплуатационным параметрам ЭВП, причем они не могли быть обеспечены конструкцией однолучевых усилительных приборов О-типа из-за высоких питающих



Рис. 197. Комиссия Совета по радиолокации, г. Берлин

напряжений и больших габаритов фокусирующих магнитных систем, а в случае приборов М-типа — из-за низкого коэффициента усиления. В США эта дилемма решалась в пользу ЛБВ, а специалисты НИИ-160 выбрали новое направление — многолучевые клистроны. Определяющую роль в широком развитии на-

Рис. 198. М. М. Федоров, директор НИИ-160 с 1953 по 1961 гг.



правления многолучевых приборов сыграли работы С. В. Королева.

Первыми руководителями НИИ-160 (1943–1951 гг.) были: С. А. Векшинский, В. И. Егiazаров, А. А. Захаров, В. А. Гольцов; руководителями опытного завода: И. И. Каминский, Д. А. Клепиков, В. П. Смиряев.

В НИИ-160 в эти годы работали: С. А. Зусмановский, зам. директора по научной части, А. А. Сорокин, главный инженер НИИ, Н. Д. Девятков, зам. главного инженера по научной части.

Начальниками отделов были Б. М. Царев, А. П. Федосеев, В. С. Лукошков, К. Н. Шахов, Г. А. Метлин, В. А. Астрин и В. Ф. Коваленко.

После войны при ГКО в середине 1940-х гг. создавались комиссии по различным наркоматам СССР с целью организации поставок различного оборудования с заводов Германии в счет репарации. Такая комиссия была создана и по радиолокации. В нее вошли и представители будущей электронной промышленности (рис. 197). Во 2-м ряду 4-й слева — зам. председателя совета Берг Аксель Иванович. 5-й слева — руководитель комиссии Совета по радиолокации А. И. Шокин. В верхнем ряду 4-й справа — Н. Д. Девятков.

Председателем Совета по радиолокации был Г. М. Маленков. Членами совета были: С. Н. Архипов — руководитель кафедры радиотехники Военно-морской академии, в начале войны он служил флагманским связистом Северного флота; А. Е. Голованов — командующий авиацией дальнего действия, маршал авиации (1944 г.); С. А. Данилин — генерал-майор, начальник НИИ ВВС, инициатор оснащения истребительной авиации бортовыми радиолокационными станциями; И. Г. Кабанов — нарком электропромышленности; В. Д. Калмыков — директор НИИ-10, в ведении которого находилось оснащение системами вооружения ВМФ; Ю. Б. Кобзарев — начальник лаборатории ЛФТИ, руководитель работ по созданию первой отечественной импульсной РЛС «Редут» (РУС-2); Г. А. Угер — научный сотрудник

НИИ ВВС, заместитель С. А. Данилина, начальника НИИ ВВС; А. И. Шахурин — нарком авиационной промышленности; А. Н. Щукин — профессор Военно-морской академии.

НИИ-160 поочередно входил в разные государственные структуры оборонных отраслей промышленности СССР (НКЭП — Наркомат электропромышленности, МПСС — Министерство промышленности средств связи, МЭСЭП — Министерство электростанций и электропромышленности, МРТП — Министерство радиопромышленности, ГК СМ СССР по радиоэлектронике и, наконец, МЭП — Министерство электронной промышленности).

Нашему институту тогда был передан государственный заказ на разработку пальчиковых ламп серии «Анод», которые были нужны для системы управления первой советской «летающей крепостью». Ранее эту задачу пытался решить Московский электроламповый завод, но неудачно. На требование Л. П. Берии дать предложения по форсированию работ А. А. Захаров, подумав, написал на чистом листе бумаги: «Повысить категоричность института; ввести дополнительный отпуск для сотрудников с ученой степенью, как в АН СССР; провести во Фрязино электричку».

Особенно показательно было исполнение указаний властных структур на примере электрички: через два месяца к городу уже подвезли пути. Н. В. Черепнину, начальнику отдела приемно-усилительных ламп, удалось решить поставленную задачу обеспечения их надежности и долговечности. Производство этих ламп стало на какой-то период основным для института.

В те годы Б. Р. Лазаренко вместе с супругой активно содействовал исследованию возможности применения электроискрового способа для изготовления деталей электровакуумных приборов в НИИ-160. Через 15–20 лет после регистрации открытия Б. Р. и Н. И. Лазаренко принципиально нового электроискрового способа обработки материалов фрязинский НИИ-160 в течение 1953–1963 гг. стал ведущей организацией в мире по созданию новых методов:

- ♦ изготовления особо точных деталей электродом-проволокой $\varnothing 6\text{--}40$ мкм;
- ♦ точного последовательного копирования профиля электродов;
- ♦ применения вместо керосина в качестве межэлектродной среды воды (в том числе из водопровода);
- ♦ принципиально нового («водяного») электроискрового оборудования.

М. М. Федоров (рис. 198), был директором НИИ-160 с 1953 по 1961 гг. Именно он дал «зеленую улицу» развитию электро-



Рис. 199. Вырезание штабика $\varnothing = 4$ мм, $l = 30$ мм из ниобия — заготовки катода — проволокой из вольфрама на установке А207.12

искровой прецизионной обработки материалов не только в возглавляемом им институте, но и на всех предприятиях радиоэлектронной промышленности, а также способствовал распространению ее в смежных отраслях. Ему по достоинству было присвоено звание лауреата Ленинской премии 1963 г. за разработку новых методов изготовления особо точных деталей. Это было «золотое» время для развития электроискровых технологий.

К моменту создания электроискровой лаборатории при ОКБМ НИИ-160 — 12 февраля 1957 г. — в семи отделах института уже постоянно применяли электроискровой способ обработки материалов. Число сотрудников, вовлеченных в процесс разработки технологии, составляло 27, из них: 5 — инженеров, 9 — техников и 3 — рабочих. А количество работающих экспериментальных установок достигло 26. Из них изготовленных в институте — 23, в том числе с электродом-проволокой ВА-3-10.

Лаборатория электроискровых технологий стала началом интенсивного развития новых методов прецизионной обработки материалов в электронной и других отраслях промышленности СССР. В том же 1957 г. в отделе 170 был организован участок изготовления сеток клистронов и замедляющих систем ЛОВ с помощью электроискровой обработки. На его площадке было установлено 7 экспериментальных установок для вырезания деталей электродом-проволокой ВА-3 $\varnothing 0,03$ мм. Они работали 2–3 смены. В отделе 200 изготавливались никелевые сетки пальчиковых ламп, а в отделе 240 разрезали штабики из тугоплавких металлов на таблетки, производили катоды из бориды лантана, заготовки катодов и др. (рис. 199).

В начале октября 1959 г. директор института Мстислав Михайлович Федоров представил достижения лаборатории первому заместителю министра радиотехнической промышленности СССР Александру Ивановичу Шокину. Тот с большим вниманием выслушал наш доклад, живо заинтересовался новыми возмож-



Рис. 200. Министр электронной промышленности А. И. Шокин

ностями процесса, высоко оценил полученные достижения, рекомендовал распространить их на предприятиях отрасли и пожелал нам новых успехов в этой области. В последующем Шокин, прекрасно разбирающийся в процессах металлообработки — поскольку был выпускником МВТУ имени Н. Э. Баумана — внимательно следил за развитием этого нового направления (рис. 200). После создания в 1960 г. Министерства электронной промышленности СССР и назначения на пост министра он способствовал демонстрации на зарубежных выставках достижений советских специалистов в области электроискровых технологий. Сначала это произошло в социалистических, а затем и в капиталистических странах. Везде наши установки пользовались неизменным успехом и привлекали к себе внимание специалистов.

Приоритет НПО «ИСТОК» (рис. 201) в области электроискровой прецизионной обработки закреплен созданием более 100 моделей оборудования (за годы его существования было выпущено в общей сложности почти 3000 образцов).

С начала 1960-х гг. НИИ-160 предстояло стать ведущей организацией в мире в области новых методов электроискрового изготовления особо точных деталей приборов и технологиче-



Рис. 201. Главный корпус НИИ-160, в центре которого с 1957 по 1960 год находилась лаборатория электроискровой обработки материалов (отмечено прямоугольником)

ского инструмента. И символично, что именно фрязинскому институту суждено было искать пути дальнейшего совершенствования этого способа, открывать новые горизонты по его использованию в электронной и смежных отраслях оборонной промышленности.

1 декабря 1960 г. лаборатория электроискровой обработки материалов НИИ-160 была реорганизована в отдел, в состав которого вошли лаборатории: технологии (руководитель — Е.В. Холоднов), источников питания (руководитель — В.Л. Кравченко), автоматизации (руководитель — К.К. Гуларян); конструкторское бюро (руководитель — Д.К. Дмитров) и опытно-производственные участки — электроискровой и механический (руководитель — Ю.А. Шевелев). В связи с этим отдел был перемещен на новые производственные площади (510 м²) главного корпуса. В соответствии с приказом министра электронной промышленности СССР А.И. Шокина отдел стал головным в отрасли в области электроискровой обработки материалов.

Мстислав Михайлович большое внимание уделял развитию этого нового направления, поверив в неисчерпаемость его возможностей в процессах изготовления электровакуумных приборов.

На опытно-производственном участке отдела изготавливались ключевые детали приборов (сеток клистронов, замедляющих систем ЛОВ сантимертового и миллиметрового диапазона, разнообразных катодов из тугоплавких и редкоземельных материалов, магнитов и т. п.), которые разрабатывались научной частью института (рис. 202). Это позволяло не только оперативно совершенствовать технологию их изготовления, но и создавать новое электроискровое оборудование, подобного которому в стране и даже в мире еще не было.

Тесная связь с создателями важнейших электронных СВЧ-приборов, с одной стороны, стимулировала и разработки в области электроискровых технологий, а с другой — позволяла не только оперативно корректировать процессы, но и создавать новое электроискровое оборудование, не имеющее аналогов в мире.

В течение двух десятилетий до начала 1990-х гг. отдел активно работал над созданием принципиально новых приборов и усовершенствованием ранее созданных, находясь на передовых позициях в области электроискровой особо точной обработки материалов.

Что произошло после развала СССР и резкого уменьшения финансирования предприятий ВПК — об этом позже. А пока вернемся в 1960-е гг.

В начале 1960-х гг. сотрудниками лаборатории источников питания отдела 62 НИИ-160,

возглавляемой В.Л. Кравченко, были созданы экспериментальные конструкции генераторов импульсов с трансформаторами на базе тиратронов, разработанных в НИИ-160, которые позволили вести электроискровую обработку материалов в обычной воде из водопровода без ее очистки и деионизации. Причем электроискровой процесс осуществлялся не только при подаче воды в зону обработки, но и при полном погружении детали в ванну, без опасения возникновения электрохимических процессов в рабочей зоне. Кроме того, изготавливать детали можно было не только электродом-проволокой, но и методом «прошивки».

Данное электроискровое прецизионное оборудование, впервые в мире созданное на головном предприятии Государственного научно-исследовательского института Государственного комитета Совета министров (ГК СМ) СССР по электронной технике — НИИ-160 — получило широкое распространение на профильных заводах.

В начале 1960-х гг. на одном из совещаний по поводу строительства на юго-западе Москвы предприятий оборонной промышленности об успехах НИИ-160 в области разработки новых методов электроискровой обработки особо точных деталей доложили Председателю ВПК Д.Ф. Устинову. Эта информация вызвала большой интерес и одобрение Дмитрия Федоровича.

Первые десятилетия развития новых электроискровых технологий практически все нынешние мировые лидеры в этой области техники активно изучали наши достижения и пытались их копировать. Главных причин первенства в те годы советских специалистов в этой области было, пожалуй, две: во-первых, сама технология впервые была разработана именно в СССР, и во-вторых, первоначально она была использована для производства передовых систем вооружения. А ведь известно, что к работе на «оборонку» в период «холодной войны» привлекались лучшие умы и значительные средства. Поэтому некоторые электроискровые установки, созданные в 50–60-е гг. XX века советскими учеными и инженерами, в мире еще и на сегодня являются непревзойденными.

На электроискровом опытно-производственном участке отдела с целью ознакомления и популяризации возможностей новых методов электроискровой обработки было налажено изготовление разнообразных сувениров. В свое время к ним проявил интерес глава государства — Н.С. Хрущев. Ему особенно понравился 24-миллиметровый шарик от подшипника, на котором была выгравирована звезда с расходящимися лучами шириной 60 мкм и свободно

перемещающимися буквами. Такие изделия он вручал в качестве подарка при встречах с руководителями других государств. Это также способствовало расширению использования метода и демонстрации его возможностей. Тогда же и возникла идея выхода предприятий, в том числе и оборонных отраслей промышленности, со своими новыми разработками на международный рынок.

Этому процессу предшествовала регулярная демонстрация электроискрового оборудования в павильоне «Космос» ВДНХ СССР в течение 1960–1962 гг. Оно пользовалось неизменным успехом, отмечалось дипломами, а участники выставки награждались золотыми, серебряными и бронзовыми медалями, а также ценными подарками (радиоприемниками, радиолами, швейными машинами, телевизорами и др. изделиями).

Однако главной задачей было распространение новых методов обработки металлов на ряде предприятий страны. С этой целью были организованы выезды специалистов НИИ-160 в некоторые города, где демонстрировалась работа электроискровых установок. Так, в Киеве на завод «Арсенал» было поставлено новое оборудование, а работники инструментального цеха были обучены работе на нем.

Хочется вспомнить об особенностях проведения исследований на «закрытых» предприятиях, об их плюсах и минусах, а также объективно сравнить имевшиеся там возможности с возможностями проведения подобных исследований в учебных институтах, например, таких как Киевский политехнический, или институтах АН СССР.

Применять промышленные электроискровые установки, разработанные Ленинградским карбюраторным заводом им. В.В. Куйбышева, Ленинградским филиалом ВПТИ МТрМ, ОКБ Главниипроекта при Госплане СССР и другими организациями, для исследования и внедрения технологии изготовления деталей электровакуумных приборов СВЧ не представлялось возможным из-за несоответствия их технических возможностей уровню поставленных задач. Необходимы были особо точные установки двух модификаций: для изготовления деталей тончайшей проволокой Ø 0,02–0,03 мм и для формобразования деталей методами копирования профиля электрода-инструмента.

В то время у нас на предприятии, входящем в одно из министерств ВПК, не было проблемы с материально-техническим обеспечением исследований. Была только одна забота: чтобы эти исследования, прежде всего, приносили пользу промышленности, а не выполнялись только для того, чтобы удовлетворять свои научные интересы за государственный

счет. Поэтому мне не пришлось проявлять чудеса изобретательности для того, чтобы где-то разыскать необходимую для исследований аппаратуру:

- ♦ инструментальные измерительные микроскопы МИИ-8, БМИ-1 и УИМ-21;
- ♦ вертикальный металлографический микроскоп МИМ-7;
- ♦ двойной микроскоп МИС-11;
- ♦ интерферометр МИМ-4;
- ♦ проекторы — большой БП и часовой ЧП;
- ♦ дуолучевые импульсные катодные осциллографы ОК-17 М;
- ♦ микротвердомер ПМТ-3 и многое другое.

Все это появлялось в лаборатории по мере необходимости. Более того, сам директор института М.М. Федоров, взявший под личный контроль развитие электроискровых технологий, ознакомившись с информацией о каком-либо новом приборе, мог позвонить мне и спросить, не нужен ли нам такой-то прибор. Сейчас это кажется фантастикой. Уровень зарплат ИТР, научных сотрудников и ученых предприятий министерств ВПК был значительно выше, чем в институтах АН СССР и высшего образования. Но наши сотрудники имели существенные ограничения в публикации результатов своих работ, возможности нормальных контактов с зарубежными коллегами на международных выставках, конференциях и симпозиумах. Были лишены, в случае необходимости, возможности обсуждения с ними возникающих проблем. **Однако я с благодарностью вспоминаю то советское время, когда мы все жили небогато, но были одеты, обуты. Не имея «прелестей» нынешней жизни в некапиталистическом обществе, мы умели без особой натуги преодолевать возникающие на нашем пути препятствия. Были уверены в завтрашнем дне. Знали, что все, что делается, — к лучшему.** Будем надеяться на будущее развитие науки и техники, не забывая о наших достижениях.

Успешная демонстрация за рубежом электроискрового прецизионного оборудования стимулировала появление в апреле 1970 г. приказа министра электронной промышленности СССР А.И. Шокина о создании Специального конструкторско-технологического отделения (СКТО) в составе НИИЭТ (НИИ электронной техники). С целью создания условий для интенсивного развития электроискрового направления приказом была предусмотрена передача строящегося рядом с НИИ-160 корпуса для размещения СКТО с соответствующими лабо-



Рис. 203. Электроискровой опытно-производственный участок отдела 62: а) кадр из кинофильма 1961 г., б) после модернизации в 1962 г.



раториями, конструкторским бюро, электроискровым опытно-производственным участком и машиностроительным цехом.

Однако данное решение не было выполнено. После завершения строительства корпуса СКТО в него были переведены: сборочный цех, КБ электровакуумного откачного оборудования, БТИ, планово-экономический отдел и другие службы НПК СТМ-6 (не имеющие отношения к электроискровой обработке материалов), и только частично отдел 62 — электрических методов обработки материалов (КБ и лаборатории). Электроискровой опытно-производственный участок (рис. 203) — полигон для отработки электроискровых технологий и связующее звено с разработчиками электронных приборов — был почти полностью передан в один из цехов завода «Рений» НИИ «Исток».

Руководивший предприятием в те годы С.И. Ребров игнорировал приказ министра. И это несмотря на то, что в 1963 г. за разработку электроискрового метода особо точного изготовления деталей была присуждена Ленинская премия! Ее лауреатами стали сотрудники предприятия: директор НИИ-160 в 1951–1960 гг. М.М. Федоров, начальник отдела электрических методов обработки материалов Б.И. Ставицкий (автор данной книги) и начальник электроискровой лаборатории отдела Е.В. Холоднов.

Опытный участок 12 лет являлся не только полигоном для отработки технологии электроискрового изготовления деталей электронных СВЧ-приборов и сложнопрофильного инструмента, но там также осуществлялось изготовление партий деталей электронных приборов по заказам научной части института (рис. 195). Например, за 1962 г. было изготовлено 1143 замедляющих системы ЛОВ электродом-проволокой \varnothing от 15 до 50 мкм (рис. 204).

Электроискровой опытно-производствен-

ный участок был для отдела связующим звеном с разработчиками приборов отделов научной части института. А его наличие позволяло не только оперативно производить необходимое обслуживание и модернизацию оборудования участка, а также совершенствовать технологию изготовления деталей, осуществлять испытания создаваемого оборудования и проверку новых электроискровых процессов, создаваемых для формообразования деталей вновь разрабатываемых электронных СВЧ-приборов.

С созданием в начале 1970-х гг. СКТО электроискрового направления в НИИ-160 могла бы появиться реальная возможность дальнейшего эффективного развития перспективного направления особо точных методов изготовления деталей и сохранение его лидирующего положения в мире. Что произошло на самом деле после окончательного отказа от создания СКТО электроискрового направления, видно из рис. 205.

За 11 лет, с 1978 по 1989 гг., количество электроискровых комплексов, выпускаемых цехом НПК СТМ 6 НИИ-160, выросло всего с 43 до 185 шт. в год. Это на порядок меньше количества комплексов, производимых одной из японских фирм. А с 1989 г. оно начало резко падать, в 1991 г. сократилось до 129, а затем почти прекратилось вовсе.

К тому же распад Советского Союза в начале 1990-х гг., ликвидация существовавшей в стране плановой системы хозяйствования, ее поспешная и необдуманная перестройка привели к развалу народного хозяйства страны, в том числе предприятий ВПК и, следовательно, электроискрового машиностроения в электронной промышленности.

В связи с резким торможением развития предприятий военно-промышленного комплекса в конце 1980-х гг. уменьшилось и финан-

сирование работ в области электроискровых технологий. Главную роль здесь сыграла ликвидация оборонных министерств, а с ней и прекращение финансирования комплексно-целевой программы «Электроника — Искра».

Производственникам пришлось смириться с необходимостью применения сборно-паяных конструкций блоков многолучевых приборов и устаревшей технологией их изготовления.

В конце 1992 г. работы по совершенствованию электроискровых технологий в НПО «Исток» были фактически прекращены, а в начале 2000-х гг. отдел электроискровой обработки материалов в ФГУП «НПП «ИСТОК» теперь Российского агентства по системам управления в наукограде Фрязино прекратил свое существование.

Просматривая работы, посвященные электроискровой обработке и опубликованные в отечественной и зарубежной печати более 50 лет назад, можно сделать следующие основные выводы.

♦ При электроискровой обработке металлов в жидкой диэлектрической среде использовались импульсы длительностью от нескольких до 1500–2000 мкс, амплитудой тока от 10 до 10000 А, частотой следования импульсов от 50 до 100000 имп/с, энергией импульсов от 0,001 до 100 Дж.

♦ Основное внимание уделялось исследованию электрической эрозии электродов при электрических разрядах, имеющих запасы энергии в импульсе в пределах от десятых долей джоуля до нескольких джоулей.

♦ Процесс электроискровой обработки легко поддается автоматизации. Занятость рабочего обслуживанием установки ограничивается 20 % времени, необходимого на производственный процесс.

♦ Электроискровой способ обработки металлов вносит не усовершенствования в существующую технику металлообработки, а является совершенно новым процессом, основанным на иных принципах и открывающим столь широкие перспективы, что слово «невозможно» должно совершенно исчезнуть из лексикона механиков. Технологии, отработанные в отделе, стали интенсивно использоваться ведущими зарубежными фирмами в области EDM-процессов. Прискорбно, но с «перестройкой», начатой Генеральным Секретарем ЦК КПСС М.С. Горбачевым в середине 1980-х гг., работы в области новых методов электроискрового изготовления особо точных деталей в НИИ-160 стали намеренно и неуклонно тормозиться.

Даже в страшном сне нам не могло прийти то, что произошло с нашей промышленностью за 15–20 последних лет.



Рис. 202. Директор НПП «Исток» С.И. Ребров демонстрирует космонавту А.Н. Николаеву кондуктор из ВК-6 (справа) с отверстиями, расточенными электроискровым способом электродом-проволокой на установке А207.23

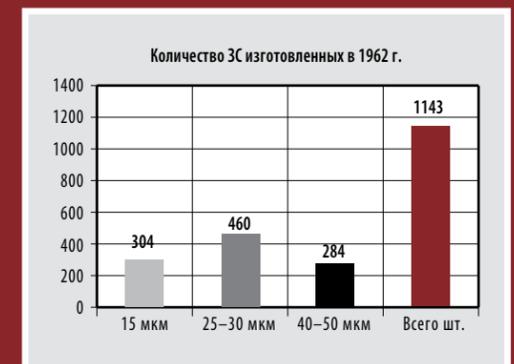


Рис. 204. За 1962 г. было изготовлено 1143 шт. замедляющих системы ЛОВ, электродом-проволокой диаметром от 15 до 50 мкм

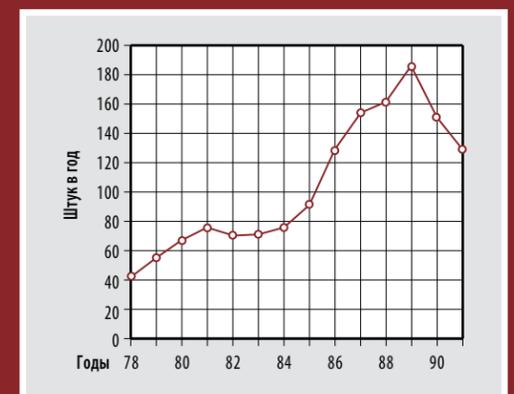


Рис. 205. Производство электроискровых комплексов в год в НПК СТМ-6 НИИ-160 в течение 1978–1991 гг.



Рис. 206. Б.Р. Лазаренко в лаборатории ВЭИ в 1938 г.

15. Учитель

15.1. Этапы жизни и деятельности Б.Р. Лазаренко

1936 г. — завершение учебы на физико-химическом отделении химического факультета МГУ и защита с оценкой «отлично» диплома на тему «Исследование причин, вызывающих разрушение материалов контактов, и изыскание способа устранения таковых». Работая затем младшим научным сотрудником во Всесоюзном электротехническом институте им. В.И. Ленина (ВЭИ), он продолжал исследования причин, вызывающих перенос материала на разрывных контактах.

1938 г. — публикация первой научной статьи «Исследование переноса и коррозии металла под действием электрических разрядов на разрывных контактах», которая и явилась основой для открытия нового электроискрового способа обработки металлов.

1938 г. — открытие нового электроискрового способа обработки металлов, сплавов и других токопроводящих материалов, получившего всемирное признание.

3 апреля 1943 г. — регистрация Б.Р. и Н.И. Лазаренко открытия электроискрового способа обработки металлов.

28 июня 1943 г. — блестящая защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Инверсия электрической эрозии металлов и методы борьбы с разрушением электрических контактов».

12 августа 1945 г. — вышло в свет постановление Совнаркома СССР о патентовании способа за рубежом.

1946 г. — получение патента на изобретение электроискрового способа во Франции, Великобритании, США, Швейцарии и Швеции.

1946 г. — изданы три монографии Б.Р. и Н.И. Лазаренко: «Электрическая эрозия металлов, Вып. I и Вып. II», а также «Физика электроискрового способа обработки металлов». Вскоре в 7-м томе энциклопедии «Машиностроение» была помещена информация о новых методах электрической обработки металлов.

1947 г. — защита диссертации «Электроискровой способ обработки металлов» на соискание ученой степени доктора технических наук, которая была ему присуждена решением ВАК от 26 июня 1949 г.

С 1953 г. — активно содействует началу исследований и применению электроискрового способа для изготовления деталей электроваку-

умных приборов (сеток клистронов для радиорелейных линий связи (РЛС), анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона длин волн) в НИИ-160, а затем созданию оригинальных электроискровых процессов (формообразования деталей электронных приборов и инструмента) и соответствующего оборудования для их осуществления. Руководит аспирантами в ГС НИИ по радиоэлектронике при СМ СССР — Б.И. Ставицкий, Е.В. Холодновым, В.Л. Кравченко, К.К. Гуляряном).

Ноябрь 1955 г. — направлен АН СССР в длительную командировку в Китай. Будучи заместителем секретаря Отделения технических наук АН СССР и директором ЦНИЛ-Электром, исполнял обязанности советника при президенте АН КНР, участвовал в разработке детального плана развития науки КНР. Кроме того, он знакомил китайскую инженерно-техническую общественность с возможностями электроискровой техники, оказывал содействие во внедрении ее в производство, способствовал созданию Пекинского института электроискровой обработки материалов.

1960 г. — издание трудов «Проблемы электрической обработки материалов», «Электроискровая обработка металлов».

1962 г. — издание трудов «Проблемы электрической обработки материалов».

К сожалению, величайшее открытие электроискрового способа обработки материалов супругами Лазаренко не всегда и не всеми было должным образом признано. Это серьезно тормозило развитие метода, а главное — внедрение его в производство. Это подтверждает его письмо «Этого не должно быть», датированное 27 апреля 1948 г.



Рис. 207. На симпозиуме в Чехословакии

«Всем известна роль русских электриков в развитии как прикладной, так и теоретической электротехники. Однако особую группу среди них представляют электрики, применившие электрическую энергию для обработки материалов, — это электросварка, обработка токами высокой частоты, электроискровая обработка.»

Особо показательным в развитии этих способов является то, что русские открытия вначале уходят за границу, где они бурно развиваются, а после этого мы, советские инженеры, оказываемся поставленными перед необходимостью догонять уже опередившую нас зарубежную технику.

Для того чтобы убедиться в этом, рассмотрим эти три открытия, причем по первым двум ограничимся напоминанием лишь некоторых факторов, а на примере электроискровой обработки, поскольку это событие настоящего времени, проследим, почему это происходит и как это делается.

В 1882 г. русский инженер Бенардос открыл способ дуговой электросварки. В 1914 г. США начали широко применять этот способ соединения металлов для восстановления судов. В советской промышленности интерес к «новому» процессу появился лишь около 1923 г. благодаря заграничным командировкам наших инженеров.

Резкий перелом в развитии дуговой электросварки в Союзе наступил лишь около 1929–1930 гг., т. е. через 50 лет после открытия способа и на 15 лет позже Америки.

В 1924 г. русский инженер Володин открыл способ высокочастотной закалки материалов. В 1930 г. он широко применялся в зарубежной технике.

В 1941 г. американцы пишут о русских ученых, «додумавшихся до применения электричества для сушки древесины», и не только широко используют этот способ в промышленном масштабе, но наладили массовый выпуск высокочастотных (бытовых) аппаратов даже для сушки овощей, сухарей и пр. У нас только налаживается производство машин т.в.ч. ламповых генераторов, а заводы и по настоящий день работают или на кустарных установках с исключительно малым к.п.д., или на «Аяксах» и трофейном оборудовании.

Спрашивается, где причины, которые допускают такое позорное положение ве-



Рис. 208. Б. Р. Лазаренко в лаборатории ИПФ АН МССР

щей, тормозят развитие советской техники и по существу обуславливают передачу за границу советской техники?

Во всех случаях эти причины — общие. И вот взяв на проверку хотя бы электроискровой способ обработки металлов, проследим историю его развития.

Первый период развития — 1935—1939 гг. является периодом первоначального накопления экспериментальных данных, их обобщений, периодом построения рабочих теорий и гипотез.

Отношение к этим работам руководства — умеренное.

Отношение научного мира — снисходительное.

Отношение промышленности — безразличное, поскольку практическая отдача от этих работ равна нулю.

Второй период развития — 1939—1942 гг.

Наметились общие контуры нового способа обработки металлов, когда становится излишним применение какого-либо режущего инструмента и не нужно считаться с твердостью обрабатываемого материала. Началось массовое распространение информации об этих работах.

Отношение руководства — умеренное.

Отношение научного мира (особенно инструментальщиков и технологов) — настороженное.

Отношение промышленности — требование немедленной выдачи сведений для реализации.

Третий период развития — 1943—1946 гг.

Отработаны основные технологические процессы, созданы первые модели электроискровых устройств. Определены основные

законы, управляющие процессом. На предприятиях с большим экономическим эффектом работают электроискровые станки собственного изготовления. Широкая информация о способе через печать, кино, радио. Авторам способа присуждается звание лауреатов Сталинской премии. Появляются первые сведения из Америки и Англии (фирмы «Илокс», «Драфто», «Томас»), сообщающие о новом способе обработки металлов, и реклама станков, выпускаемых этими фирмами.

Отношение руководства — бюрократически-бездушное.

Отношение научного мира: физики и энергетики — всемерная поддержка,

специалисты — инструментальщики, технологи, станочники — резко враждебны: «Нельзя обрабатывать металл без инструмента», «Все это бред, очковтирательство, закрыть способ».

Отношение промышленности — всемерная помощь и поддержка. Настойчивые требования о выдаче хотя бы элементарной технической документации, помощи в освоении, консультации. Все эти требования удовлетворяем в небольшой степени из-за отсутствия людей, помещения и средств.

Четвертый период развития — 1946 г. — 11 ноября 1947 г.

При полном отсутствии приказов со стороны министерств имеет место массовое движение в промышленности по освоению этого способа. Особенно болезненно ощущается наша организационная беспомощность по оказанию совершенно необходимой широкой помощи промышленности. Мы не имеем возможности даже отвечать на письма. Все попытки как-то увеличить мощность лаборатории хотя бы приемом новых сотрудников терпят неудачу.

Промышленность кустарничает и проводит процессы электроискровой обработки металлов на недопустимо низком техническом уровне.

Государство тратит многие миллионы рублей на развертывание параллельных работ по электроискровой обработке в различных министерствах. Организационный хаос в этом направлении — полнейший.

Исключительно повышенный интерес к этому способу в США. Американцы начали развивать большую активность по использованию «русских эрозионных машин» и уверенно разворачивают это направление работ.

Оспаривая советский приоритет, они, тем не менее, широко публикуют этот способ, тщательно переписывая статьи из русских журналов, порою даже не указывая, откуда заимствуют материал.

Появились первые случаи ввоза из Америки станков электроискрового действия (фирмы «Илокс»).

Наметились первые симптомы потери Советским Союзом имевшегося технического опережения — американцы освоили электроискровой способ обработки алмазов, в то время как мы не можем приступить к выполнению этой же задачи, несмотря на специальное постановление Совета Министров (№ 3049—989 от 12 августа 1947 г.)...

Все то же, отсутствие какой-либо поддержки руководства, начиная от директора института, до работников министерства включительно.

Появилась новая крупная опасность — группа бизнесменов..., которая, руководствуясь лишь корыстными целями и совершенно не интересуясь развитием способа и состоянием дела, начала захламлять промышленность никуда не годными конструкциями.

Не имея никакого представления о способе, начали широко информировать промышленность выдачей элементарно неграмотных сведений о режимах обработки, чем в корне дискредитируют способ.

Они не связывают свою судьбу со способом, их не интересует завтрашний день, для них основное сегодня — это источник прибыли, источник легкого существования. Несмотря на нашу крайнюю ограниченность в людях, мы были вынуждены еще часть своих сил отвлечь от выполнения исследовательских работ и бросить их на борьбу с этой халтурой.

Число технологических процессов, выполняемых с помощью электроискрового способа, резко возрастает.

В Московском авиационном технологическом институте состоялся первый выпуск инженеров-электроискровиков.

ЦК ВКП/б заинтересовался этим направлением работ и после соответствующего обследования обратился с письмом в Бюро Машиностроения Совета Министров СССР с рекомендацией рассмотреть этот вопрос в отношении дальнейшего развития и внедрения электроискрового способа.

11 ноября 1947 г. состоялось заседание Бюро Машиностроения, где 7 министров доложили о том, какой эффект уже получает промышленность от применения электроискрового способа обработки металлов, и отметили недопустимый разрыв между требованиями промышленности и сведениями, получаемыми в этом направлении. Было принято решение:

Создать мощную научно-исследовательскую организацию по дальнейшему развитию работ, связанных с электроискровой обработкой материалов.

Созвать в марте месяце 1948 г. Всесоюзную конференцию по электроискровой обработке металлов для информации о последних достижениях в этой области и обмена опытом.

Ввести в учебные планы технических ВУЗов специальные курсы по электроискровой обработке металлов, с тем чтобы обеспечить подготовку необходимых кадров.

Создать комиссию из 10 человек (председатель т. е. Сабуров), которой поручить в месячный срок (т. е. к 11 декабря 1947 г.) войти в Правительство с проектом решения о необходимых мероприятиях по развитию и внедрению электроискровой обработки металлов.

Я полагал, что этим предварительным решением уже предрешился дальнейший путь развития этого способа и что совсем уже близко то время, когда в стране от применения этого способа освободятся многие тысячи рабочих и казна получит миллиардные экономии.

На деле оказалось обратное.

11 ноября 1947 г. начинается пятый и, пожалуй, самый показательный этап развития.

Элементарная логика вещей подсказывает, что нужно было предпринять, — создать организацию, способную самостоятельно решать любую из поставленных научных и технических задач. Организацию, располагающую широкой производственной базой, выпускающей в металле не только опытные образцы станков электроискрового действия, но и мелкие серии станков, организацию, не только координирующую действия промышленности в этом направлении, но и способную оказать широкую техническую помощь, как в освоении способа, так и быстром решении отдельных задач. Наша страна располагает сейчас всеми данными для такого способа решения задач.



Рис. 209. Кадр из фильма



Рис. 210. Вице-президент АН МССР, академик Б.Р. Лазаренко. ИПФ, 1979 г.

Однако я убедился, что такой способ решения задачи — единственно верный способ — не встретил полной поддержки.

Прежде всего, поданный мною в МЭП проект такой организации, весьма скромный по запросам и жесткий по отдаче промышленности, вызвал в министерстве чувство недоумения. Очевидно, вследствие этого проект вначале был сокращен примерно в 10 раз, затем в 2 раза и, наконец... оказался в архивах министерства.

Во-вторых, мне было предложено найти какое-то помещение, где можно было бы разместить эту вновь создаваемую организацию. Несмотря на всю сомнительность такого образа действий, я был вынужден закрыть часть работ и направить инженеров на поиски подходящих пустых коробок.

С громадными трудностями, все же найдя таковые и доказав, что их можно занять, мне, тем не менее, было вскоре сообщено, что они непригодны, т. к. «там все же когда-то будут работать организации, на территории которых они расположены».

Лишь через 1,5 месяца собралось первое (и последнее) заседание рабочей подкомиссии, на котором поговорили о необходимости дальнейшего развития электроискрового способа. Характерно, что через 2 дня после этого заседания по Москве (в том числе по телефонам) дискутировалось людьми, не бывшими на заседании, мое сообщение, сделанное там, в том числе о секретном способе обработки металлов на расстоянии (очевидно, в ближайшем будущем новом средстве вооружения).

Еще более странными оказались следующие события, непосредственно уже направленные на недопущение создания такой организации.

Членом Госплана т. Никитиным за визой т. Сабурова (письмо от 17.02.48 г.) было дано указание, по которому Министерство

электропромышленности должно заниматься изучением физики электроискрового процесса и отработкой электрических схем питания, а Министерство станкостроения (никогда не строившее электрических установок) должно отрабатывать конструкции установок электроискрового действия и разрабатывать новую технологию электроискровой обработки (!?).

Вскоре вытлыли на поверхность и причины, обусловившие появление столь аномального явления (отрыва теоретической базы от конструкторов и технологов). Оказалось, что это результат действия все той же группы бизнесменов, неверно информировавших руководство.

Услышав о создании такой организации, координирующей действия промышленности, и поняв, что с ее появлением раз и навсегда исчезнет всякая халтура, а с нею и длинный рубль, они развили неимоверно бурную деятельность в направлении недопущения создания такой организации.

Первой для них задачей было как-то сохранить возможность проведения комбинаций. Очевидно, что если это будет только электроискровой способ обработки металлов, где все направление предельно ясно, то всякая возможность комбинаций исключается. Следовательно, нужно добиться того, чтобы в постановление Правительства об электроискровой обработке материалов вписать какой-то еще способ электрической обработки материалов, отличающийся хотя бы по названию от электроискрового способа, например, анодно-механический. Но ведь такого способа юридически нет. Отсюда возникает вторая задача — оформить юридически этот способ и притом так, чтобы он дискредитировал электроискровой способ.

Для выполнения этой задачи из архивов извлекается неутвержденная заявка 20-летней давности (автор Гусев и Рыжков), приводится в действие Патентное управление Гостехники.

Заявке придается название анодно-механический способ обработки и вопреки действующему законодательству начинает активизироваться вопрос о возможности утверждения задним числом (1928 г.) мифического анодно-механического способа обработки металлов.

Далее возникает третья задача — доказать, что электроискровой способ обработки металлов нерентабельный и что нужно применять анодно-механический способ. С этой целью во Всесоюзном научно-исследовательском инструментальном институте (директор Надеинская), где не имеется ни одного электроискрового станка, например, для за-

точки инструмента, спешно «доказывается» полная непригодность электроискрового способа для обработки твердых сплавов. Начинается всемерный звон...

Полгода прошло с момента заседания Бюро Машиностроения, а уровень организационных форм, на которых мы сейчас находимся, стал еще ниже.

Изложенное выше показывает, что для решения организационных вопросов нужны какие-то иные, неведомые мне приемы и действия. И вот, как у своего старшего товарища, я спрашиваю Вас — Что это за приемы? Научите меня им!

Я одиннадцать лет работаю без отпуска и практически без выходных дней. Моя жизнь — это работа, и вот хотя бы этот простой довод дает мне право спросить Вас — почему нам мешают работать?

Почему с каждым днем нас все больше и больше отвлекают от нашей работы, вследствие чего мы вынуждены заниматься всякими другими делами вроде, например, написания вот таких писем? Разве, в конечном счете, это метод, с помощью которого задерживается развитие важнейшей области нашего Народного хозяйства?

Мы вместе с Вами поднимаем общее государственное дело, а следовательно, и отношение к нему должно быть государственным, а то, что я описал, это порочно и не характерно для нашего стиля работы. Этого не должно быть!..

**27 апреля 1948 года
Лауреат Сталинской премии,
кандидат технических наук
Б. Лазаренко».**

После событий, описанных в цитированном выше письме Б.Р. Лазаренко, произошло нижеследующее.

В июне 1948 г. Постановлением Правительства была создана ЦНИЛ-Электром в составе НИИ-627 МЭП СССР во главе с Б.Р. Лазаренко, которая в 1953 г. была выделена в самостоятельную организацию и разместилась на территории Николо-Прервинского монастыря города Люблино.

В середине 1950 г. в издательстве «Госэнергоиздатом» вышла книга доктора технических наук Б.Р. Лазаренко и инженера Н.И. Лазаренко «Электроискровая обработка металлов». Она представляла собой конспективное изложение вопросов, связанных с применением электроискровой обработки металлов — метода, широко применяемого в промышленности.

Казалось, что все шло весьма успешно, нарастала популярность электроискрового способа, но...

В 1955 г. ЦНИЛ-Электром была переведена в систему АН СССР, но какой ценой!

Доктор технических наук, профессор Б.Р. Лазаренко, заместитель академика секретаря Отделения технических наук АН СССР, директор ЦНИЛ-Электром, 16 ноября 1955 г. был командирован в Китайскую Народную Республику советником по науке при президенте АН КНР. Исполнение обязанностей директора ЦНИЛ-Электром по рекомендации Б.Р. Лазаренко было возложено на Б.Н. Золотых, заведующего отделом физики.

Для АН КНР направление Б.Р. Лазаренко в Китай было подарком, но для развития электроискрового способа в СССР — большим минусом. В КНР ему пришлось участвовать в разработке детального плана развития науки, знакомить инженерно-техническую общественность с возможностями электроискровой техники, оказывать содействие во внедрении ее в производство, стимулировать создание Пекинского института электроискровой обработки, обеспечивать связь с АН СССР...

Несмотря на эту командировку в КНР, в конце 1957 г. под редакцией Б.Р. Лазаренко в издательстве АН СССР выходит 1-й выпуск Трудов ЦНИЛ-Электром «Электроискровая обработка металлов».

В феврале 1958 г. Борис Романович, наконец, был отозван в Москву и вернулся к исполнению обязанностей директора ЦНИЛ-Электром АН СССР.

К этому времени в Издательстве АН СССР вышла монография Б.Р. и Н.И. Лазаренко «Электроискровая обработка токопроводящих материалов», в которой излагалась информация об электроискровом способе обработки материалов, открытом в СССР и широко уже применяемом как у нас, так и за рубежом. Изложены физические основы, энергетические характеристики и преимущества этого способа. Даны основные схемы, описаны технологические возможности обработки, принципы конструирования электроискровых установок, а также различные операции, выполняемые этим способом.

В начале 1961 г. у Б.Р. Лазаренко состоялась беседа с председателем президиума Молдавского филиала АН СССР Я.С. Гросулом и вице-президентом АН СССР А.В. Топчиевым. Они предложили ему возглавить институт энергетики и автоматики создаваемой Академии наук Молдавии...

И вот в августе 1961 г. Б.Р. Лазаренко был избран академиком создаваемой Молдавской АН ССР.

А в декабре 1961 г. назначен директором Института энергетики и автоматики АН МССР, преобразованного в 1965 г. в Институт прикладной физики.

15.2. Ученики и соратники

Наталья Иоасафовна Лазаренко

Со своим будущим мужем и коллегой по работе Наталья Иоасафовна Лазаренко (рис. 211, 212) познакомилась еще в конце 1920-х гг. в московской школе № 28. Когда-то возвращаясь вместе домой из школы, они не подзревали, что вот так им предстоит бок о бок шагать почти пять десятилетий. (Наталья Иоасафовна пережила своего спутника на 18 лет)...

В конце лета 1936 г. студенты химического факультета Московского государственного университета Борис Лазаренко и Наташа Толчина (будущая Лазаренко) успешно защитили дипломные работы.

Проблемы последующего трудоустройства у них не существовало. Его ожидала должность инженера в лаборатории магнитных, полупроводниковых и контактных материалов, а ее — в лаборатории сухих элементов Всесоюзного электротехнического института.

Вскоре они стали работать над решением задачи, которую им поставил профессор Владимир Васильевич Усов. Задача была на первый взгляд проста и конкретна: найти сплав, который был бы способен противостоять искровому воздействию в цепи, содержащей индуктивность.

Как известно, контакты выключателей и различных реле изнашиваются и могут приобретать вид, показанный на рис. 213, поэтому поставленная задача была весьма актуальной. При исследовании работы реле с контактами из благородных металлов было решено перейти к релейным системам, работающим в жидких средах. С этой целью были проведены измерения, выполненные на установке, схематически представленной на рис. 214.

Микроскопическое и химическое исследование осадков, образовавшихся в результате работы контактной системы, показало, что они представляют собой шарообразные частицы материала электродов (рис. 215). Исследователи также отметили, что во всех случаях взаимодействия контактов в жидкой среде их электрическая эрозия была значительно большей, чем в воздухе при тех же параметрах электрической цепи.

В результате этих исследований ученые сделали выводы. Во-первых, невозможно создать мощную релейную систему, контакты которой работают в жидкой среде, и во-вторых, они открыли новый низковольтный электрический способ измельчения токопроводящих материалов. Последний вывод представлял большой практический интерес. Дело в том, что



Рис. 211. Б. Р. и Н. И. Лазаренко лауреаты Сталинской премии, 1960-е гг.



Рис. 212. Борис Романович и Наталья Иоасафовна Лазаренко в лаборатории ЦНИЛ-Электром АН СССР. Люблино, Шоссейная улица, 92. 1958 г.



Рис. 213. Эрозия контактов

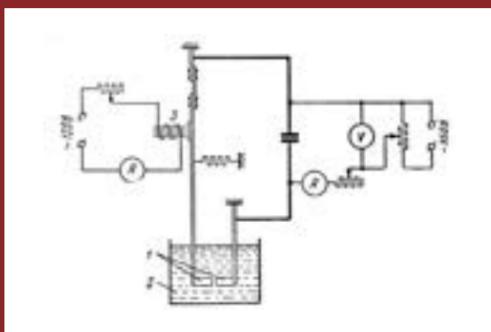


Рис. 214. Схема установки для изучения работы электрических контактов в жидких средах

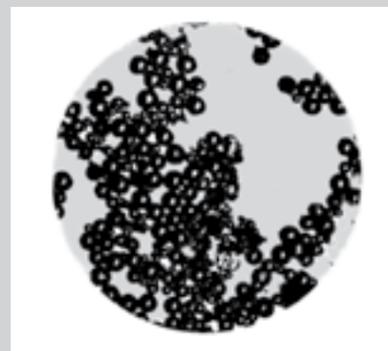


Рис. 215. Осадки, образовавшиеся в результате работы контактной системы, представляют собой шарообразные частицы материала электродов

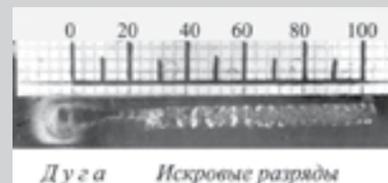


Рис. 216. Эрозиограмма искровой и дуговой форм электрического разряда



Рис. 217. Схема инверсии электрической эрозии



Рис. 218. Отверстия, изготовленные в закаленной стальной пластине дугowym и искровыми импульсами электрического тока

промышленность предъявляла исключительно жесткие требования к качеству различных порошков. Металлокерамика, химическая, и полиграфическая промышленность, металлотермия, производство взрывчатых веществ — вот далеко не полный перечень отраслей промышленности, использовавших порошки в качестве исходных материалов.

Дальнейшие исследования показали, что для диспергирования пригодна только искровая форма электрического разряда, и чем дальше смещена схема в искровую область от границы инверсии, тем производительнее идет процесс (рис. 216, 217).

По существующей легенде первой обратила свое внимание и, следовательно, сделала открытие способа электроискровой обработки именно Наталья Иоасафовна.

С этого момента борьба с вредным явлением — разрушением электрических контактов — превратилась в изыскание способов, увеличивающих их эрозию, с целью использования этого процесса для размерной обработки металлов непосредственно электрическими разрядами.

На рис. 218 представлена закаленная стальная пластина, отверстия в которой получены исследователями в закаленной стальной пластине дугowym и искровыми импульсами электрического тока. Изображение свидетельствует, что в том случае, когда между электродами происходит искровой разряд, отверстие имеет правильные геометрические формы, четкие грани и полное отсутствие на поверхности даже цветов побежалости. Когда же между электродами возникает дуговой электрический разряд, поверхность вокруг отверстия сильно оплавляется. Ясно, что ни о какой размерной, т. е. точной обработке металлов в этом случае не может быть и речи.

Мстислав Михайлович Федоров

М.М. Фёдоров — директор НИИ-160 в 1953–1961 гг. а затем заместитель министра электронной промышленности СССР.

Он дал «зеленую улицу» развитию электроискровой прецизионной обработке материалов не только в НИИ-160, но и во всех предприятиях радиоэлектронной промышленности, а также способствовал распространению её в смежных отраслях. Ему по достоинству было присвоено звание лауреата Ленинской премии 1963 г. за разработку новых методов изготовления особо точных деталей. Это было «золотое» время для развития электроискровых технологий.

М.М. Фёдоров родился 23 декабря 1908 г. в Санкт-Петербурге в семье рабочих Выборг-

ского завода. В 1934 г. он окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Радиофизика». А затем начал работать над проблемами фотоэффекта в Центральной радиолаборатории Ленинграда. Он вел темы по цезиевым фотоэлектронным иконоскопам и таллиевым сопротивлениям.

В 1936 г. при передаче разработок таллиевых сопротивлений для внедрения в производство М.М. Федоров вместе с группой, которой он руководил, был переведен на завод во Фрязино на должность начальника цеха. В начале Великой Отечественной войны он был назначен директором части завода, эвакуированной в Уфу. А в 1948 г. его назначили начальником 5-го Главного управления Министерства промышленности средств связи (МПСС), в ведении которого находился Фрязинский НИИ-160.

Мне довелось с ним познакомиться в 1950 г. после окончания Московского авиационного технологического института, когда я был направлен на Специальные курсы при МВТУ имени Н.Э. Баумана для изучения электровакуумного производства вместе с выпускниками других ВУЗов страны, а после их окончания в Саратов на завод электровакуумного машиностроения 5-го ГУ МПСС. Но я никогда не оставлял желая посвятить свою жизнь разработке электроискровых особо точных технологий и соответствующего оборудования для их осуществления, а также обещания своей супруге (тогда ещё невесте), добиться за достижение этой цели присуждения престижной премии.

Через три года я поступил в аспирантуру фрязинского НИИ-160 по специальности, связанной с электроискровыми технологиями. Здесь у меня состоялась вторая встреча с Мстиславом Михайловичем — уже директором НИИ-160. Он заинтересовался моей диссертационной работой и первыми результатами по исследованию возможности применения электроискрового способа в производстве электровакуумных СВЧ-приборов (клистронов, ЛОВ и магнетронов миллиметрового диапазона длин волн, специальных ПУЛ). Поверив в неисчерпаемость возможностей этого способа, он сделал все зависящее от него, чтобы обеспечить развитие этого нового способа, создав лабораторию электроискровой обработки металлов. Он внес неоценимый личный вклад в разработку методов изготовления деталей из различных материалов и создание электроискрового прецизионного оборудования

Открытая защита диссертации состоялась в Клубе города Фрязино на тему: «Исследование возможности применения электроискровой обработки для изготовления прецизионных деталей электровакуумных приборов». Научный



Рис. 219. В. М. Рыбачук, Заслуженный машиностроитель Российской Федерации, ведущий конструктор электроискрового оборудования НИИ-160 электронной промышленности.

руководитель лауреат Сталинской премии, доктор технических наук, профессор Б.Р. ЛАЗАРЕНКО, Консультант: к.т.н. Б.Н.ЗОЛОТЫХ.

Работа была выполнена в ГОСУДАРСТВЕННОМ СОЮЗНОМ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО КОМИТЕТА СОВЕТА МИНИСТРОВ СССР по радиоэлектронике.

М.М.Фёдорову в 1963 году вместе со мной и Холодновым Е.В., была присуждена Ленинская премия за разработку особоточных методов изготовления деталей.

Всеволод Михайлович Рыбачук

Всеволод Михайлович Рыбачук (рис. 219) после окончания в середине 1960-х гг. МВТУ им. Н.Э. Баумана был направлен в НИИ-160, в конструкторское бюро отдела электрических методов обработки материалов, основной целью которого было исследование возможности применения электроискрового способа для изготовления деталей электровакуумных приборов.

Он сразу же подключился к созданию электроискрового оборудования. В результате к середине 1960-х гг. появилось новое перспективное направление в электронной промышленности Советского Союза — электроискровое прецизионное машиностроение. В свое время под руководством В. Рыбачука с целью определения оптимальной жесткости были проведены исследования конструкций кареток координатных столов станков. При этом учи-



Рис. 220. Ю. А. Шевелев. Фото 1950-х гг.



Рис. 221. К. К. Гулярян. Фото 2009 г.

тывались требования к точности изготовления деталей электронных приборов и прецизионного инструмента. Конструктивное исполнение устройств координатных перемещений и схема взаимного положения винта и упругих элементов гаек позволили на порядок повысить точность конструкций.

Юрий Александрович Шевелев и Ким Комитасович Гулярян

В разработку новых технологий неоценимый вклад внесли воспитанники многих вузов, таких как МАТИ (Московский авиационный технологический институт), МЭИ (Московский энергетический институт), МВТУ им. Н.Э. Баумана, Ереванский политехнический институт. Среди специалистов, создававших первые экспериментальные образцы электроискрового оборудования, не имеющего отечественных и зарубежных аналогов, следует упомянуть Юрия Александровича Шевелева (рис. 220, фото 1950-х гг.) и Кима Комитасовича Гуляряна (рис. 221, фото 2009 г.). Они были направлены в НИИ-160 в 1950-х годах.

Ю.А.Шевелев — в отдел 170, возглавляемый В.А. Гордеевым, а К.К.Гулярян — в отдел 140, возглавляемый А.П. Федосеевым, который заинтересовался темой диссертации Б.И. Ставицкого, в частности, возможности электроискрового изготовления анодных блоков магнетро-

нов миллиметрового диапазона и создал группу под его руководством. Оба были подключены к решению проблемы применения электроискрового способа для прецизионного изготовления деталей электровакуумных приборов СВЧ.

В 1954 г. для электроискрового изготовления анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона волн на базе БМИ (большого инструментального микроскопа) К.К. Гулярян принимал участие в создании установок ЭКУ-1 при участии механика высшей квалификации А.В. Белоусова.

Ю.А. Шевелев решал вместе со мной, ещё аспирантом, проблемы электроискрового изготовления сеток клистронов непосредственно в диафрагмах клистронов для радиорелейных линий связи из хромистой меди. Созданный нами станок ЭПС-2 предназначался для одновременной электроискровой «прошивки» десятков и сотен квадратных или прямоугольных отверстий непосредственно в диафрагмах отражательных клистронов.

Были созданы первые в мире экспериментальные электроискровые установки для обработки деталей вольфрамовой проволокой ВА-3 Ø 20–40 мкм. В отделе 170 — на базе биологического микроскопа МБИ-1, а в отделе 140 — на базе большого инструментального микроскопа БМИ-1.

Для изготовления деталей электровакуумных СВЧ-приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона волн, на тот момент не было ни отечественного, ни зарубежного опыта создания электроискрового прецизионного оборудования, предназначенного для изготовления особо точных миниатюрных деталей электрон-



Рис. 222. На ВДНХ СССР, после демонстрации установок с тиратронными генераторами. Б. И. Ставицкий и В. Л. Кравченко (слева)

ных приборов и других изделий электронной и смежных отраслей техники.

На установке ЭКУ-1 в феврале 1954 г. были изготовлены первые образцы медных анодных блоков магнетронов миллиметрового диапазона длин волн. Их изготовление осуществлялось проволокой ВА-3 Ø 30 мкм выпускницей фрязинской школы Наталией Шуклиной, успешно освоившей эту технологию практически без автоматизации процесса. Первый 20-ти резонаторный анодный блок был изготовлен 9 февраля 1956 г. проволокой из вольфрама ВА-3 диаметром 30 мкм. И хотя первые анодные блоки были миниатюрных размеров, они предвещали наступление новой эры в производстве деталей электронных приборов.

Важной особенностью способа являлось то, что для осуществления этой удивительной технологии не требовалось изготовления какого-либо сложнопрофильного инструмента, так как его роль выполняла тончайшая проволока, диаметр которой меньше толщины волоса блондина. При этом применение проволоки Ø 0,02-0,04 мм сулило перспективу изготовления деталей с минимальным превращением металла в стружку и незначительным количеством электроэнергии, так как ширина образующегося при этом паза ничтожно мала. При использовании в качестве электрода-инструмента вольфрамовой или молибденовой проволоки, применялись электрические импульсы малой энергии (меньше 0,001 Дж) микросекундной длительности (до 1 мкс), что обеспечивало высокое качество деталей.

С момента создания Электроискровой лаборатории, преобразованной в Отдел электрических методов, директор НИИ-160 М.М. Фёдоров постоянно уделял внимание развитию этого направления, поскольку верил в его широкие возможности в совершенствовании технологических процессов изготовления электровакуумных приборов.

В. Л. Кравченко

После окончания Московского текстильного института в середине 1950-х гг. В.Л. Кравченко был направлен на работу в КБ при научной части НИИ-160. Во время нашего совместного поиска места, на котором можно бы начать исследования возможности применения способа электроискровой обработки деталей, мы стали друзьями и единомышленниками. После преобразования лаборатории электроискровой об-

работки в отдел, Кравченко возглавил разработку конструкции источников питания для изготовления деталей электровакуумных приборов, где в качестве межэлектродной среды вместо керосина применялась вода.

На рис. 222 на ВДНХ СССР, после демонстрации установок с тиратронными генераторами Б.И. Ставицкий и В.Л. Кравченко (слева)

В.Л. Кравченко был вместе со мной инициатором создания в начале 1957 г. в НИИ-160 лаборатории для внедрения электроискрового способа обработки деталей новых электровакуумных СВЧ-приборов. Именно с ним мы обратились со служебной запиской к главному инженеру НИИ-160 М.С.Акулину по поводу внедрения на предприятии электроискрового способа изготовления деталей, разрабатываемых электровакуумных приборов и целесообразности объединения усилий специалистов разных структурных подразделений института, занятых вместе с нами решением стоящих вопросов по применению электроискрового способа, в одном месте.

Наша идея заинтересовала директора института М.М. Федорова. Внимательно выслушав наши предложения, он быстро решил этот вопрос, издав 12 марта 1957 года приказ о создании при ОКБМ института Лаборатории электроискровой обработки металлов, назначив меня начальником электроискровой лаборатории и выделив для её размещения более 500 кв. метров в центре третьего этажа только что подготовленного зала к эксплуатации.

15.3. И многие другие...

До начала 1990-х гг. отдел вел активную деятельность, находясь на передовых позициях особо точной электроискровой обработки материалов.

Созданные в НИИ-160 СВЧ-генераторы малой и повышенной мощности находили применение в разнообразных сферах военной и гражданской техники. Общее руководство этим направлением осуществлялось Н.Д. Девятковым.

К середине 1960-х гг. были разработаны многочисленные конструкции отражательных, пролетных, пролетно-отражательных клистронов, ЛОВ с магнитной и электростатической фокусировкой.

Многие из них можно отнести к приборам, определяющим мировой научно-технический уровень того времени. Среди них — отражательные клистро-



Рис. 223.
Шубин Николай Георгиевич.
Фото 1980-х гг.

ны с электронной настройкой (М.Б. Голант), высокостабильные отражательные клистронные генераторы малой (Л.А. Парышкуро) и повышенной мощности (В.Н. Лебедев) и др., ЛОВ с периодической электростатической фокусировкой (А.М. Алексеенко), ЛОВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов (А.А. Негирев, В.С. Савельев) и ряд других приборов.

Первыми мощными генераторными СВЧ-приборами, созданными в НИИ-160, были магнетронные генераторы. У истоков этого направления в институте стояли С.А. Зусмановский и А.П. Федосеев. Еще в начале 50-х гг. прошлого столетия в институте сложились коллективы талантливых молодых ученых, создавших первые отечественные образцы магнетронов. В этих устройствах широко использовались оригинальные решения, позволившие достичь самых высоких параметров, известных в то время в мировой технике. Это мощные 3-см магнетроны с быстрой перестройкой частоты (Э.А. Гельвич), ставшие основой создания первых оригинальных отечественных помехоустойчивых корабельных и самолетных РЛС.

Необходимость создания новых конструкций магнетронов стимулировала интенсивное развитие многих технологических направлений: электроискровой обработки материалов, новых конструкций катодных узлов, СВЧ-керамики.

Опираясь на эту технологическую базу, были не только разработаны оригинальные базовые конструкции, но и заложены физико-теоретические основы создания мощных перестраиваемых магнетронов со сверхвысокой частотной стабильностью (Л.Г. Некрасов, Д.Е. Самсонов). Эти устройства позволили наладить выпуск высокоэффективных радиолокационных станций для ПВО и аналогичных корабельных РЛС.

Тогда же началась разработка первых отечественных усилителей М-типа — амплитронов, на базе которых была создана РЛС обнаружения, ставшая в 1960-х гг. основой ПВО страны (Ю.А. Искренко).

Дальнейшее развитие этого направления вылилось в серию амплитронов, обладающих широкой полосой усиливаемых частот, а также высокой и средней импульсной мощностью (Тагир Васильевич Зиангиров). На их основе была разработана серия корабельных радиолокационных станций (РЛС).

В конце 1960-х годов началась разработка первых отечественных усилителей М-типа — амплитронов, на базе которых была создана РЛС обнаружения, ставшая в 1960-х годах основой ПВО страны (Ю.А.Искренко). Дальнейшее развитие серии амплитронов, обладающих широкой полосой усиливаемых частот и высокой средней и импульсной мощностью получили приборы, созданные Тагирдзяном Валиахметовичем (его

звали все Тагиром Васильевичем) Зиангировым. На их основе была создана серия корабельных радиолокационных систем (РЛС).

Под руководством Тагира Васильевича была создана целая серия амплитронов со своеобразными названиями, такими как «Саперави».

На рис. 224 представлен анодный блок амплитрона «Салют», изготовленный электроискровым способом с применением двух проволок.

Из фото рис. 224 очевидна ничтожность удаляемого материала (хромистой меди) в виде «стружки», представляющей из себя застывшие шарики размером не более микрона. Реально на фотографии внизу от заготовки лежат куски удаленного, рядом с заготовкой блока.



Рис. 224. Анодный блок амплитрона «Салют». Ламели: ширина — 4 мм, высота — 12 мм. d = 14 мм D = 62 мм. Точность изготовления элементов 0,01 мм.

В 9-резонаторном блоке амплитрона макете «Салют», представленном на рис. 225, вырезано только 7 резонаторов. На фотографии видны параллельные пазы шириной 0,12 мм, выполненные двумя проволоками. После последовательного прорезания 9 пар пазов (образования 9 ламелей) одна из проволок отрезалась. Затем осуществлялось последовательное вырезание 9 резонаторов одной проволокой (за счет поворота стола) с удалением образующихся при этом отходов. Применение двух проволок при вырезании ламелей обеспечивало их абсолютную идентичность, наивысшую точность размеров по ширине и наименьшую шероховатость обработанной поверхности (соответствующую выбранному режиму обработки) при чрезвычайной простоте процесса.



Рис. 225. Анодный блок амплитрона (макет «Салюта»). Высота — 50 мм. $D = 62$ мм, $d = 14$ мм. Ламели — 4 мм. Вырезано 7 резонаторов.

Новое направление развития миниатюрных генераторов и усилителей М-типа в 1970-е гг. предложил Леонид Григорьевич Некрасов на основе изобретенных им и его сотрудниками замедляющих систем. Миниатюрные усилители обладали большим (до 60 %) КПД, чем аналогичные мощные транзисторные приборы в сантиметровом диапазоне волн. И в то же время их масса и габариты были равны либо даже меньше. Они успешно применялись в устройствах связи космических объектов (например, в проекте «Вега — Венера — комета Галлея», в приемопередатчиках спутниковых систем связи и т. п.).

В создание тиратронных генераторов большой вклад внес Н.Г. Шубин (рис. 223), осуществлявший их разработку, компоновку основных узлов, монтаж и настройку.

16. Противостояние

В течение длительного времени большое влияние на техническую политику станкостроительной отрасли Советского Союза оказывал головной институт Минстанкопрома — Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков (ЭНИМС). Станкостроение — сердце машиностроения: от правильной политики этого министерства зависел технический прогресс многих отраслей.

Противодействие развитию электроискрового способа и его авторам, группой ведущих специалистов-станкостроителей, возглавляемой ЭНИМС, непрерывно возрастало еще с момента регистрации способа и присуждения Сталинской премии его изобретателям.

Поэтому и решение Бюро машиностроения СМ СССР от 11 ноября 1947 г. о создании мощной научно-исследовательской организации по дальнейшему развитию работ, связанных с электроискровой обработкой материалов, так и не было выполнено.

В свое время авторитет ЭНИМСа был высок, исследования его ученых ценились и у нас в стране, и за рубежом, но в то же время известные заводы — ЗИЛ, МЗМА, ВАЗ, КамАЗ и другие — оснащались импортными электроэрозионными (электроискровыми) станками и оборудованием. Этому всемерно способствовало Всесоюзное объединение «Станкоимпорт».

Случилось так потому, что политика отдела электрофизических и электрохимических

методов обработки ЭНИМСа, возглавляемого Абрамом Лазаревичем Лившицем, привела к тому, что СССР, имевший в этой области долгое время приоритет, с каждым годом терял завоеванные позиции.

Используя авторитет уважаемого института, в основу деятельности названного отдела был положен тезис: «То, что сделано другими, плохо». А раз так, то «зеленая улица» представлялась собственным разработкам вне зависимости от их качества и новизны решения.

Подтверждением сказанному может служить тот факт, что на протяжении десятилетий многие весьма важные для промышленности разработки по тем или иным причинам отклонялись, мягко говоря, без достаточных на то оснований. Например, ни одна из моделей прецизионных станков, разработанных в системе Министерства электронной промышленности (а их разработано к середине 1970-х гг. многие десятки), не была освоена и не ставилась на производство в системе Минстанкопрома. И это несмотря на то, что наши работы в 1963 г. были удостоены Ленинской премии. А, как известно, Ленинские премии в области науки и техники, так же, как и Сталинские, присуждались за работы, имеющие мировой приоритет. К тому же станки, выпускаемые Министерством электронной промышленности СССР, поставлялись в промышленно развитые страны. Электроискровое оборудование пользовалось большим спросом в стране, но его выпуск был

явно недостаточным. Такое оборудование наша промышленность могла иметь в достатке, если бы отдел ЭНИМСа не отгораживался от «чужих» разработок.

Газета ЦК КПСС «Социалистическая индустрия» в ноябре 1977 г. под рубрикой «КАК УСКОРИТЬ ВНЕДРЕНИЕ», в статье «СВОИ» И «ЧУЖИЕ», поднимала вопрос об отрицательном отношении отдела электрофизических и электрохимических методов обработки ЭНИМСа как головной организации станкостроения к работам, выполняемым «чужими» организациями.

«Как и ради чего отдел ЭНИМСа встает на дороге, мы можем увидеть, ознакомившись с «примечательной» судьбой станка «4531», разработанного ЦНИЛ-Электром. В 1964 году этот первый в мире электроэрозионный станок с числовым управлением (ЧПУ) с первого предъявления был принят государственной комиссией к серийному производству на Кировском станкостроительном заводе. Но, увы, этот станок в том комплекте, в каком его приняла госкомиссия и признала отвечающим уровню мировых образцов, так и остался в единственном экземпляре. Сотрудники ЭНИМСа немало преуспели в том, чтобы не допустить к серийному производству эту модель станка»

Вот мнение Е.М. Левинсона, известного ученого и практика, одного из пионеров электроискровой обработки, опубликованное в газете «Социалистическая индустрия» № 25 (2627) от 10 февраля 1978 г. в статье корреспондента газеты В. Андриющука «Себя хвалить не сложно»:

«За тридцать лет работы мне неодно-

кратно приходилось сталкиваться с противодействием А. Лившица — руководителя отдела ЭНИМСа — всему, что исходило не от него и его единомышленников.

Интересы личные и ведомственные уже много лет сдерживают прогресс в этой области. Именно из-за них важные для народного хозяйства разработки ученых оказываются нереализованными».

Мысль о неиспользованных возможностях, о локальном применении научных достижений, о ведомственной ограниченности, о связанном с этим отставанием в газете подчеркивали д.т.н. Д. Васильев, д.т.н. Г. Мещеряков. О тревожном положении дел с координацией работ в этой области речь шла и на расширенном заседании секции электрических методов обработки научного совета при Госкомитете по науке и технике. В официальном ответе заместителя министра станкостроительной и инструментальной промышленности СССР А. Прокоповича редакции было сказано, что руководители технического управления Минстанкопрома и ЭНИМСа рассмотрели принципиальные вопросы, затронутые газетой, и дали соответствующие указания подчиненным НИИ об усилении контроля над объективностью принимаемых ими решений. А приложенное к письму «заключение комиссии научно-технического совета» отвергло критику начисто, доказывая, что созданное в системе Минстанкопрома оборудование электрофизико-химической обработки отвечает высшему уровню качества, что координация работ в этой области осуществляется на должном уровне.

Однако этому противоречили отзывы с заводов: «На станке 4Д721, который по паспорту считается точным, мы ведем только грубую обработку. Мы пытались решить вопрос производства прессформ с использованием станков Минстанкопрома 4Д721 и 4Д722. Однако не достигли успеха, так как эти станки не обеспечили обещанных показателей», — писали представители Московского комбината твердых сплавов...

Б. Р. Лазаренко и его единомышленники всеми силами отстаивали преимущества разработанных технологий и оборудования. Издание Трудов ЦНИЛ-Электром

АН СССР в 1960–1962 гг., появление журнала «Электронная обработка материалов» в 1965 г., а также публикации в Вестнике АН СССР статей Б. Р. Лазаренко имели большое значение для постоянной и объективной информации о достижениях в области электроискровых технологий. Благодаря журналу «Электронная обработка материалов» возникла возможность свободной и, главное, оперативной публикации достижений в этой важной отрасли науки и техники в течение почти 50 лет (рис. 226).

После состоявшегося в ЦНИЛ-Электром АН СССР выездного заседания Отделения технических наук президиума АН СССР, академик А. А. Благодеров предложил демонстрировать на ВДНХ достижения электроискровой обработки материалов с участием ЦНИЛ-Электром и других организаций.

В 1960 г. такая тематическая выставка была организована в павильоне «Космос» и прошла с большим успехом. В ней принимал участие и НИИ-160, демонстрируя свое электроискровое оборудование для изготовления особо точных деталей в электронной промышленности, в том числе и созданные впервые в мире комплексы для изготовления важнейших деталей электронных приборов. Началось триумфальное шествие электроискровой обработки материалов. Все это, а также поддержка предприятий оборонной и электронной отраслей промышленности и, прежде всего, НИИ-160, способствовало тому, что ЭНИМСу стало труднее противодействовать развитию технологии электроискровой обработки в стране.

Электронная промышленность к началу 1960-х гг. стала не только самым активным пользователем новых методов электроискровой обработки. Ее специалисты были вынуждены начать проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию оригинальных методов электроискрового формообразования и принципиально нового электроискрового оборудования и осуществлять его изготовление в необходимых для отрасли количествах, противодействуя негативному отношению к электроискровому способу ЭНИМС — головной организации Минстанкопрома. В эти годы в стране с ее подачи лихорадочно и формально проводились работы по созданию так называемых гибких производственных модулей и участков, разрабатывались комплексно-целевые программы по совершенствованию различных производств. Создавались показательные участки ГПМ, было много шума, желаемое выдавалось за действительное.

Через три года после возвращения Б. Р. Лазаренко из КНР началась кампания, затеянная Н.С. Хрущевым по передаче НИИ-160 и лабораторий технического профиля из АН

СССР в ведение соответствующих министерств.

ЦНИЛ-Электром была передана в состав ЭНИМС ГК СМ СССР по автоматизации и машиностроению (позже Минстанкопрома) — главного организатора многолетней кампании против электроискрового способа металлообработки. Таким образом, судьба ЦНИЛ-Электром была решена не в пользу развития электроискровых технологий.

Протесты против передачи ЦНИЛ-Электром АН СССР Минстанкопрому ведущих специалистов, председателя Научного совета АН СССР по проблеме «Новые процессы получения и обработки металлических материалов» президента АН УССР академика Б. Е. Патона, Координационного совета по новым методам обработки материалов оборонных отраслей промышленности и др. были игнорированы.

На многих всесоюзных конференциях ученые высказывались за воссоздание такого центра, каким был ЦНИЛ-Электром АН СССР. Но, увы, решение межотраслевого вопроса зависело от сотрудников ЭНИМСа, которые не поддерживали эту идею. Куда бы кто ни обращался (например, в Госкомитет по науке и технике), то обязательно это предложение попадало на заключение к А. Л. Лившицу как единственному представителю единственной «специализированной» организации. Он был председателем секции электрофизических и электрохимических методов обработки Совета по машиностроению при Госкомитете по науке и технике СССР, а состав Совета обеспечивал «свое» большинство. В результате за эту «монополию» СССР расплатился очень дорого, ибо из пионеров в области электроискровых технологий превратился в отстающих.

В апреле 1970 г. вышел приказ министра электронной промышленности СССР А. И. Шокина о создании Специального конструкторско-технологического отделения (СКТО) в составе НИИЭТ (НИИ электронной техники).

Обеспокоенные задержкой исполнения приказа министра дирекцией НИИ-160, я и начальник лаборатории источников питания отдела 62 В. Л. Кравченко обратились в ГНТУ МЭП СССР к В. М. Пролейко с докладом о задержке работ по созданию СКТО электроискрового направления в составе НИИ-160. Он попросил подготовить на имя министра соответствующее письмо с изложением возникшей проблемы и, ознакомившись с ним, посоветовал передать его в канцелярию министра, обещав нам поддержку. Неискушенные в бюрократических уловках чиновников, мы так и сделали.

Однако все произошло не так, как мы ожидали. Письмо попало на глаза заместителю министра А. А. Захарову, курирующему предпри-

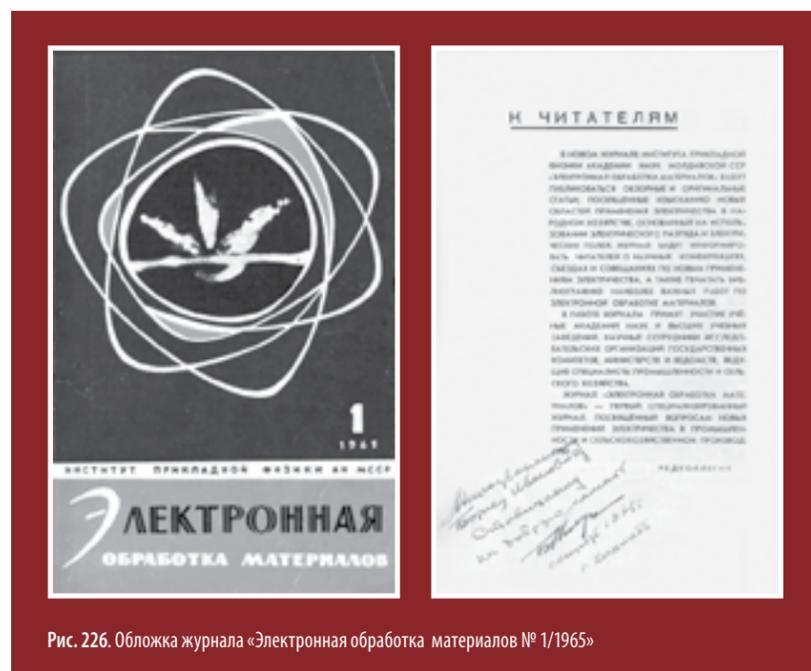


Рис. 226. Обложка журнала «Электронная обработка материалов» № 1/1965»

тия Главного управления, к которым относился и НИИ-160. Он недоброжелательно (возможно, ревниво) относился к действиям М. М. Федорова, активно поддерживающего развитие электроискрового направления в институте, и поэтому немедленно принял соответствующие контрмеры (прежде всего такие, чтобы письмо не попало в руки министру). Никакой поддержки со стороны ГНТУ не последовало...

Из интервью директора ЦНИЛ-Электром АН СССР Б. Р. Лазаренко журналу «Изобретатель и рационализатор» в середине 1970-х гг.

«То, что будет сообщено ниже, мы обычно никому не говорим, тем более не публикуем. Но поскольку вы представляете ВОИР, т. е. организацию, призванную руководить деятельностью изобретателей, вы должны знать об этом. Знать хотя бы для того, чтобы ошибки, описанные ниже, не повторялись. Эти ошибки позволяют зарубежным странам брать наши достижения и очень скоро, развивая и внедряя их, отбрасывать нас (страну) куда-то на 4–5 место (где мы и находимся сейчас по электроискровой обработке металлов), а самих авторов изобретения ставить в положение, вызывающее недоумение даже у наших иностранных коллег.

С целью создания наиболее благоприятных условий для развития электроискрового способа обработки материалов в 1948 г. в составе Министерства электропромышленности СССР на правах института была создана Центральная научно-исследовательская лаборатория электрической обработки материалов (ЦНИЛ-ЭЛЕКТРОМ), а Президиум Академии наук СССР в 1954 г., рассмотрев ее достижения, перевел ее в систему академических учреждений.

Как видите, внешне пока все благоприятно. Но! Представьте ситуацию.

Сотни ученых, свыше 60 кафедр вузов и четыре крупнейших научно-исследовательских института совершенствуют теорию резания металлов, разрабатывают оптимальную геометрию режущих граней инструмента, создают особо твердые материалы, чтобы в результате этого лучше резать металл, и имеют немалые заслуги в этой области.

Это с одной стороны. С другой — два едва оперившихся молодых специалиста (Н. И. и Б. Р. Лазаренко — ред.) доказывают и главное — показывают, что для громадного большинства случаев режущий инструмент вообще не нужен, так же, как не нужны и многие самые современные металлорежущие станки.

Так что? Все это сомкнутым строем идущее «войско» будет кричать нам «Ура!» и рас-

ступаясь, давать дорогу? Нетрудно представить, какими «розами» был немедленно усыпан наш путь. Это представить, а что было в действительности, известно лишь нам двоим.

Было брошено все, чтобы сбить этот процесс, любым путем скомпрометировать его, а попутно и нас самих. Особенно в этом направлении свирепствовали Научно-исследовательский институт инструмента и Экспериментальный научно-исследовательский институт металлорежущих станков (ЭНИМС). Тем не менее, с помощью молодого талантливого коллектива, который вокруг нас сформировался, начальная стадия битвы была выиграна.

К концу 50-х гг. ЦНИЛ-Электром АН СССР, по общему признанию, был основным научным центром нашей страны, в котором решались многие научные и прикладные вопросы. В составе ЦНИЛ-Электром АН СССР были лаборатории, конструкторское бюро и опытно-экспериментальный завод. Работы возглавляли 5 докторов и 18 кандидатов наук. Готовились кадры через аспирантуру, в том числе для зарубежных стран.

Отделение технических наук АН СССР вынесло решение, и аппарат Президиума АН СССР готовил проект Постановления о переводе ЦНИЛ-Электром в ранг академического института. Одновременно в промышленности стали создаваться базовые лаборатории, которые решали многие, в том числе крупные задачи отрасли в области электроискровой обработки металлов. О характере этих задач можно судить хотя бы потому, что многие из авторов, решившие их, удостоивались правительственных наград, а наши ученики, Б. И. Ставицкий и Е. В. Холоднов, были удостоены Ленинской премии.

И вдруг мы узнаем о передаче из Академии наук СССР в промышленность всех учреждений технического профиля деятельности. Как следствие, ЦНИЛ-Электром переводится в ЭНИМС.

Нетрудно представить, что произошло дальше. ЭНИМС под предлогами «концентрации усилий», «упразднения многоотности» и пр. ликвидировал ЦНИЛ-Электром. Все ведущие сотрудники этой организации перешли работать в другие организации. (Наталия Иоасафовна перешла на работу во Всесоюзный институт авиационных материалов МАП (ВИАМ), где она и работала старшим научным сотрудником до ухода на пенсию).

Поскольку у меня к тому времени был накоплен некоторый опыт по организации науки (работа в Президиуме АН СССР, Президиуме АН КНР), меня направили в Молда-

вию для работы в создаваемой там Академии наук. Молдавская республика в то время была республикой сельскохозяйственной и, тем не менее, ЦК КПМ и СМ СССР поддержали мою просьбу о создании в Молдавии научного центра по электрической обработке материалов.

Все необходимые инстанции Москвы поддержали это предложение. Однако на заседании СМ СССР с возражением выступил министр станкостроения тов. Костоусов. Мол, это их область деятельности. В результате подготовленный нами проект Постановления СМ СССР был полностью принят, но в части исполнителей переадресован на Министерство станкостроения.

Разгромив ЦНИЛ-Электром и имея упомянутое Постановление СМ СССР, ЭНИМС очень легко добился решения, что в нашей стране он — головная организация по электрической обработке материалов.

Но нужно что-то противопоставить электроискровой обработке материалов. С этой целью присваивается себе замечательное изобретение уральского рабочего тов. Кармастина (тоже целая эпопея!). Затем все это выдается как некая «электроимпульсная» обработка металлов, во много раз по всем показателям превосходящая электроискровой способ. Все виды рекламы и информации были пуценены в действие. В стране — недоумение. Прекращают заниматься электроискровой обработкой и переходят на электроимпульсную обработку.

Ничего не получается. Чтобы громче все звучало, нужно иметь своих ученых. Спешно по совокупности работ сотрудник ЭНИМС тов. Лившиц успешно защищает у себя в институте докторскую диссертацию. Поскольку она — сплошной плагиат, а на поверку оказалось, что юридически такого и способа нет, а акты о внедрении — фиктивны, ВАК три года не утверждал диссертации. Три комиссии ВАК дали отрицательный отзыв. Но силен ЭНИМС (да, видно, и порядки были хороши) — последовал громкий голос сверху и тов. Лившиц — доктор наук.

Сейчас ВАК снова рассматривает этот вопрос, поскольку работающие в этой области два специалиста (тов. Фотеев и тов. Щепетов) обратились с соответствующей просьбой к XXV Съезду КПСС.

Да! Но ведь остались базовые лаборатории в промышленности! Они продолжают для своей отрасли разрабатывать новые конструкции электроискровых установок и новые электрические процессы обработки материалов. Их разработки всегда пользовались неизменным успехом (награждались) в отделе

машиностроения ВДНХ СССР.

Нужно и этот канал перекрыть! Вынесено и выполнено решение: изъять из экспозиции ВДНХ СССР все, относящееся к электроискровой обработке материалов, и демонтировать все это только в залах ЭНИМС.

В итоге:

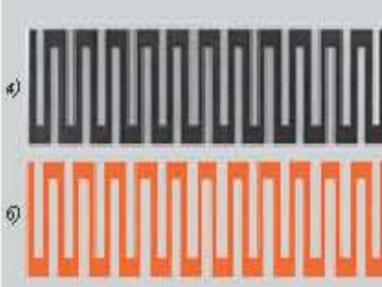
Не только инженерная общественность страны, но и многие руководящие товарищи не знают современных возможностей электроискровой техники и каких масштабов внедрения достиг этот процесс в капиталистических странах. Для примера достаточно сказать — только у Форда 60 % всех штампов изготавливают электроискровым способом, а мы ковыряем их вручную.

Всеми странами признается наш приоритет, но мы потеряли превосходство по применению этого процесса. Мы отброшены на 4–5 место. Вследствие деятельности ЭНИМС в нашей стране нет современных станков для электроискровой обработки материалов. Мы начали ввозить их из-за рубежа...». Это интервью Б. Р. Лазаренко — крик души человека, посвятившего всю свою жизнь любимому делу, которое ему, да и, как оказалось десятилетием позже, его верным ученикам, не удалось завершить достойно.

Радует только то, что оно было подхвачено зарубежными фирмами, которые оценили важность этого открытия и обеспечили его достойное использование.



Стр. 14. Головка полуавтоматической установки А207.03



Стр. 16. а) фрагмент огуфтаЭС из зрннстой меди. Штърн: шнрнна 0,4 мм, вьсота 5 мм. Точность шага ± 0,005 мм; б) фрагмент отхода



Стр. 27. Деталь, изготовленная спомощью специального комплекта электроэкс-инструмента, состоящего из нескольких медных пластин толщиной 4 мм



Стр. 19. Электронсоровый станок А207.19 для изготовления анодов и блочков приборов М-типа двумя проволоками



Стр. 19. Электронсоровый станок А207.27 для изготовления анодов и блочков приборов М-типа двумя проволоками и со встроенным тиристорным генератором импульсов



Стр. 28. Изготовление медной проволоки с 0,5 мм твердосплавной матрицей толщиной 0,05 мм в рубцовом штампе, для изготовления пластины ротора электродринг зтава



Матрицы штррей в плазме, прорезаны на разньх режимах электроэкс-проволокой в пакетах из медной пластины толщиной 0,07 мм каждая



Стр. 19. Фрагмент 10-ти резонаторного блока. Шнрнна ламелей 0,4 мм



Стр. 69. Электронсоровый комплекс «Мур 5-200» модели А207.92М со встроенным генератором импульсов и управлением по 5-ти осям с СЧПУ на базе компьютера



ООО «НПК «Дельта-Тест» на международной выставке «Металобработка-2006»



Стр. 20. Анодовый блок катодитрона «Салют». Заготовка. D=62 мм, b= 14 мм, вьсота 12 мм



Стр. 20. Катодная борда катитрона (а) с 0,5 мм, торец - сфера R=4,5 мм; б) с 0,4-0,5 мм, торец - сфера R=3,5 мм



Стр. 68. Электронсоровый комплекс «Мур 3-200» модели А207.92М с встроенным генератором импульсов и управлением по двум осям с СЧПУ на базе компьютера



Стр. 86. Вад из фнлмны - электронсоровый оптико-пронзводственный участок



Станок модели АРТА 250



Стр. 22. Группа колец «Знаки» одинаков, вьрезаны и электроэкс-проволокой в зэго товкж из нержавеющей стали с 0,2 мм, поверхность ю торца вьз предзарительного отжироваия и покрытия титаном титана



Стр. 16. ФрагментЭС из трех пластины 0,1 мм. Паьы шнрнна — 0,05+0,005 мм, длина — 0,7 мм. Общее число пазов ЭС-161